

ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA EL MANEJO DE  
LIXIVIADOS Y SU APLICABILIDAD EN EL MEDIO

MANUELA ARBELÁEZ MESA

JUAN ESTEBAN GARCÍA SIERRA

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2010

ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA EL MANEJO DE  
LIXIVIADOS Y SU APLICABILIDAD EN EL MEDIO

MANUELA ARBELÁEZ MESA

JUAN ESTEBAN GARCÍA SIERRA

Proyecto de grado para optar por el

Título de Ingeniero Mecánico

Enrique Posada Restrepo

Ingeniero mecánico y master en ingeniería mecánica

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2010

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS .....	7
LISTA DE TABLAS .....	13
AGRADECIMIENTOS.....	12
GLOSARIO .....	13
RESUMEN.....	15
1. DEFINICIÓN CLARA Y CONCRETA DEL PROBLEMA .....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. GENERALIDADES .....	20
3.1 RELLENOS SANITARIOS .....	21
3.2 DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL ÁREA METROPOLITANA .....	25
3.2.1 Basurero de Moravia.....	25
3.2.2 Relleno Sanitario Curva de Rodas.....	26
3.2.3 Relleno Sanitario La Pradera. ....	28
3.2.4 Centro Industrial del Sur – CIS. ....	30
3.3 ORÍGENES DE LOS LIXIVIADOS .....	34
3.4 GENERACIÓN DE LOS LIXIVIADOS .....	34
3.5 COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVIADOS .....	36
3.6 EFECTOS DE LOS LIXIVIADOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE .....	39
3.7 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS Y LIXIVIADOS EN COLOMBIA ....	45

4. LEGISLACIÓN PARA EL MANEJO Y TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS	48
4.1 LEGISLACIÓN EN COLOMBIA	48
4.2 LEGISLACIÓN EN EL MUNDO	50
5. TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS PARA EL MANEJO Y TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS	63
5.1 PROCESOS BIOLÓGICOS	63
5.2 PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS	70
5.3 PROCESOS AVANZADOS CON MEMBRANAS	77
5.4 MECANISMOS DE BAJO COSTE	79
6. APLICABILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS	81
6.1 LIXIVIADOS JÓVENES	83
6.2 LIXIVIADOS MADUROS	84
6.3 AGUAS RESIDUALES	85
6.3.1 Industrias Químicas	86
6.3.2 Industrias de Alimentos	87
6.3.3 Industrias de lavandería y tintorería	89
6.3.4 Lavado doméstico	90
7. USOS Y APLICABILIDADES DE LOS RESIDUOS DE LOS LIXIVIADOS	93
7.1 COMPOSTAJE	93
7.2 BACTERIAS GENERADORAS DE ENERGÍA	94
7.3 ALGAS GENERADORAS DE ENERGÍA	95
7.4 IRRIGACIÓN	96
8. PROBLEMAS CONCRETOS DEL MEDIO	99

8.1 CENTRO INDUSTRIAL DEL SUR - CIS.....	99
8.2 COLORQUÍMICA S.A. ....	114
8.2.1 Aguas de la planta de alimentos.....	119
8.2.2 Aguas del resto de la empresa. ....	121
8.3 OTRAS VISITAS.....	123
Se realizaron dos visitas a empresas adicionales, con el propósito de documentar los métodos que se emplean para tratar las aguas residuales de otro tipo de industrias. En este caso se visitó una empresa de alimentos avícolas y una lavandería industrial, como se muestra a continuación. ....	
8.3.1 ALIMENTOS FRIKO S.A.....	123
8.3.2 WASH S.A. ....	129
9. CONCLUSIONES .....	136
10. RECOMENDACIONES.....	140
11. BIBLIOGRAFÍA .....	141

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Botadero a cielo abierto.....	21
Figura 2. Contaminación en un relleno sanitario.....	24
Figura 3. Relleno Sanitario Curva de Rodas.....	26
Figura 4. Relleno Sanitario La Pradera.....	29
Figura 6. Planta de separación de residuos, El Guacal. ....	32
Figura 7. Planta de tratamiento de lixiviados. ....	33
Figura 8. Variación del índice de biodegradabilidad con la edad del lixiviado. ....	39
Figura 9. Sistema de disposición final año 2006.....	46
Figura 10. Sistema de disposición final año 2006.....	47
Figura 11. Lodos activados.....	64
Figura 12. Fases del proceso en SBR. ....	65
Figura 13. Filtro percolador.....	67
Figura 14. Contactor biológico rotatorio. ....	68
Figura 15. Reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos. ....	69
Figura 16. Fraccionamiento amoniacal.....	74
Figura 17. Adsorción por carbón activo. ....	76

Figura 18. Recirculación de lixiviados por aspersión. ....	79
Figura 19. Techo tanque recogida de lixiviados.....	102
Figura 20. Diseño de cuadrícula. ....	103
Figura 21. Filtro primario. ....	104
Figura 22. Laguna de oxidación.....	105
Figura 22. Reactor anaerobio de flujo ascendente. ....	106
Figura 23. Mezcla rápida con cal. ....	107
Figura 24. Desarenador final.....	108
Figura 25. Laguna de aireación. ....	109
Figura 26. Apariencia del lixiviado tratado. ....	110
Figura 31. Colorquímica S.A.....	115
Figura 27. Alimentos Friko S.A .....	124
Figura 28. Celdas de Flotación. ....	126
Figura 29. Celdas de residuos de lodos.....	127
Figura 30. Quema de gas metano. ....	128
Figura 32. Draga.....	130
Figura 33. Roto Shear.....	131
Figura 34. Residuos sólidos proceso roto shear.....	131
Figura 35. Serpentín. ....	132

Figura 36. Celdas de flotación. ....	133
Figura 37. Filtros. ....	134
Figura 38. Flitro prensa lodos. ....	135



## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Composición media de un lixiviado joven y maduro. ....	38
Tabla 2. Compuestos orgánicos volátiles en lixiviados y efectos en la salud. ....	42
Tabla 3. Metales presentes en líquidos lixiviados y efectos en la salud. ....	43
Tabla 4. Compuestos orgánicos sintéticos presentes en los líquidos lixiviados y sus efectos en la salud. ....	44
Tabla 5. Alcoholes encontrados en líquidos lixiviados y sus efectos en la salud...	45
Tabla 6. Lixiviados y calidad del vertimiento a fuentes superficiales. ....	49
Tabla 7. Laguna de oxidación El Guacal. ....	105

## DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a todas esas personas que con su apoyo y dedicación han contribuido tanto a nuestro desarrollo personal como profesional.

Especialmente a nuestros padres y familiares por la comprensión y el soporte que nos brindaron durante esta etapa de nuestras vidas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera especial al Ingeniero Enrique Posada Restrepo por su apoyo incondicional y desinteresado. Y asesoría para que el proyecto cumpliera a cabalidad los objetivos planteados.

A todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de este proyecto.

A la Universidad EAFIT y a sus docentes por el conocimiento que nos han brindado.

## GLOSARIO

AEROBIA: que hay presencia de oxígeno.

ANAEROBIO: que hay ausencia de oxígeno.

COAGULACIÓN: proceso de adición de sales de hierro y aluminio para remover las impurezas presentes en las aguas.

COLOIDE: es un sistema físico-químico que está formado por dos fases, una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas.

COT: carbono orgánico total.

DBO: demanda biológica de oxígeno.

DQO: demanda química de oxígeno. Representa el oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica completamente sin importar su degradabilidad.

ESCORRENTÍA: es la lámina de agua que circula en una cuenca de drenaje, es decir la altura en milímetros de agua de lluvia escurrida y extendida dependiendo la pendiente del terreno.

EVAPOTRANSPIRACIÓN: es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo.

FAFA: filtro anaerobio de flujo ascendente.

FLOCULACIÓN: proceso químico que mediante la adición de sustancias floculantes elimina las impurezas de las aguas.

FLOTACIÓN: proceso de clarificación primaria particularmente efectivo para tratar aguas con baja turbiedad, altamente coloreadas y con gran contenido de algas.

INFILTRACIÓN: penetración del agua en el suelo por grietas y poros.

LIXIVIADOS: son los líquidos que se producen al descomponerse los desechos sólidos y el agua lluvia, filtrándose y arrastrando partículas en suspensión.

MUTAGÉNICO: que produce cambios en el material genético, o mutaciones en el organismo.

PERCOLACIÓN: se refiere al paso lento de las aguas a través de los materiales porosos

SBR: reactor biológico secuencial.

SEDIMENTACIÓN: es la remoción de las partículas suspendidas en el agua por efecto de la gravedad.

SS: sólidos en suspensión.

TERATOGENICO: que genera malformaciones.

UASB: reactor anaerobio de flujo ascendente.

## RESUMEN

Los lixiviados son los líquidos que se generan de la descomposición de los residuos sólidos y de la percolación del agua lluvia a través de dichos desechos. Estos líquidos son altamente contaminantes, por lo que existen en el mundo legislaciones que promueven el uso de diferentes tecnologías y métodos que ayudan a reducir el impacto negativo de éstos sobre el medio ambiente.

El objetivo de este proyecto, es realizar un estudio detallado del proceso de generación de los lixiviados y las tecnologías que existen para tratarlos, con el propósito de destacar las metodologías más adecuadas para llevarlo a cabo en el medio, planteando soluciones para problemas concretos.

El trabajo se basa principalmente en la revisión bibliografía de libros, revistas, trabajos de grado anteriores, Internet y en visitas realizadas a diferentes empresas del área metropolitana.

Las propuestas de tratamiento se realizaron para dos empresas locales, y en éstas se contempla el uso de sistemas de tratamiento que cuenta con varias etapas, como lo son pre-tratamientos donde se remueven los sólidos y grasas, tratamientos primarios donde se degrada el material orgánico, tratamientos secundarios para remover de forma efectiva los sólidos presentes en el líquido pre-tratado, y tratamientos terciarios que ayudan a pulir las características del líquido resultante.

Palabras claves: Lixiviado, percolados, relleno sanitario, tratamiento, agua residual.

## INTRODUCCIÓN

Los lixiviados o percolados son los líquidos con contenido sólido que se generan una vez el agua pasa a través de cualquier superficie permeable. En su mayoría son generados en los rellenos sanitarios, cuando el agua lluvia penetra a través de los residuos en descomposición, arrastrando de esta manera sales, minerales y nutrientes. Estos líquidos se filtran en el suelo causando diversos problemas ambientales, por lo que se crea la necesidad de tratarlos.

Para llevar a cabo el manejo de los lixiviados se emplean en el mundo metodologías y técnicas de diferentes tipos y complejidades que pueden ser tanto biológicas, físico-químicas y tecnológicas. La depuración vegetal, la depuración por membranas, carbón activado y la ósmosis inversa son algunos de los métodos que se utilizan.

El proyecto busca información sobre las generalidades de los lixiviados, su composición, los efectos de éstos sobre el medio ambiente, y los diferentes métodos que se emplean a nivel mundial para tratarlos. Se habla además del estado en que se encuentra el manejo de lixiviados en Antioquia.

Finalmente se plantea una propuesta de solución a dos problemas concretos de la ciudad, donde se aplican conceptos de ingeniería y se proponen ideas para el mejoramiento de las tecnologías existentes que son aplicadas actualmente a dichos problemas.

## 1. DEFINICIÓN CLARA Y CONCRETA DEL PROBLEMA

Cada día son más los residuos sólidos, líquidos y gaseosos que se generan en la sociedad, y aún mayores los deseos del hombre por conservar el medio ambiente. Razón por la cual surge la necesidad de tratar los lixiviados, que se generan especialmente a causa de los rellenos sanitarios y las aguas residuales industriales.

Estos líquidos percolados contaminan el suelo una vez lo penetran, lo que puede ocasionar a su vez contaminación en los sembrados y en las aguas subterráneas, recurso de gran importancia para el abastecimiento de agua. En otros casos, los lixiviados son extraídos de los rellenos y de los procesos y caen directamente a las fuentes de agua sin tratar, si no se someten a un tratamiento adecuado.

Actualmente existen diversas metodologías a nivel mundial para llevar a cabo el manejo de los lixiviados, los cuales incluyen tanto procesos sencillos físico-químicos como sistemas de gran complejidad tecnológica.

Por lo anterior, se busca con este proyecto conocer las generalidades de los lixiviados, su forma de generación, las normas por las cuales se rigen y los diferentes métodos que se utilizan para tratarlos en el mundo, para concluir sobre los métodos más adecuados y plantear soluciones para el tratamiento de éstos en la sociedad.

La legislación cada vez es más exigente con respecto al tema ambiental, incluso muchas empresas han tenido que cambiar sus políticas y tecnologías para poder cumplir con todos los requerimientos y leyes que rigen actualmente. Por esto, la información contenida en este proyecto puede servirle a la industria, en especial a las compañías con mayores problemas de generación de estos líquidos, ya que



este documento les permitirá revisar y analizar propuestas acerca de la manera más adecuada de tratarlos.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el proceso de generación de los lixiviados y las tecnologías existentes para tratarlos, con el propósito de destacar las metodologías más adecuadas para llevarlo a cabo en el medio y plantear soluciones para problemas concretos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer y entender el concepto de los lixiviados y su forma de generación.
- Investigar las normas vigentes en el mundo, especialmente en Colombia, que rigen el manejo de los lixiviados.
- Reconocer los impactos ambientales que se generan por el mal manejo de los lixiviados.
- Identificar los procesos físico-químicos, y tecnológicos existentes para el tratamiento de lixiviados.
- Revisar la aplicabilidad de las metodologías existentes para problemas concretos del medio.
- Presentar los métodos más viables para llevar a cabo el tratamiento de lixiviados en la sociedad.
- Plantear soluciones para casos determinados del medio.

### 3. GENERALIDADES

El incremento en la generación y acumulación de residuos sólidos, dio como resultado la necesidad de llevar a cabo una gestión de los desechos, por lo que se crearon diferentes maneras de controlar el problema, ya fuera mediante la incineración, la recolección y posterior disposición en rellenos, depósitos, vertederos, botaderos, entre otros; y más adelante a través de la separación de residuos que pueden reutilizarse.

Uno de los grandes contaminantes procedentes de los rellenos sanitarios, son los líquidos que se generan al descomponerse la materia orgánica, los cuales se filtran a través de los desechos y arrastran otros sólidos que se encuentran en suspensión. Incluyen también las sales solubles existentes que son arrastradas por las aguas que entran en contacto con ellas. Estos líquidos se conocen como lixiviados o líquidos percolados.

En la legislación colombiana, en el Decreto 838 de 2005, *por el cual se modifica el Decreto de 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones*:

Se define al lixiviado como el líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de los residuos sólidos bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas y/o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación.

Los lixiviados son un potencial contaminante para los suelos y las aguas subterráneas, por lo que los rellenos sanitarios, deben ser construidos sobre una base impermeable donde se acumulan, y deben ser recolectados a través de sistemas de recogida, para luego recibir un tratamiento ya sea físico, químico, biológico, o hacer una recirculación del lixiviado al relleno sanitario.

### 3.1 RELLENOS SANITARIOS

En principio, es importante aclarar que un relleno sanitario no es lo mismo que un botadero de basura a cielo abierto. Un botadero a cielo abierto, es una de las prácticas más antiguas de disposición final de residuos utilizada por el hombre. En estos botaderos, se tira la basura y luego se abandona sin ningún tipo de tratamiento ni separación, lo cual lleva a grandes problemas ambientales contribuyendo a la contaminación del aire, agua y suelos, Estos tres recursos naturales se ven deteriorados por la producción de gases, quemas, malos olores, líquidos lixiviados, etc.

En la actualidad, este tipo de prácticas son consideradas como irresponsables, debido a los problema de salud que pueden ocasionar a las personas que vivan cerca de éstos, a la fauna, la flora, etc. Además, también se puede ver la reventa de materiales y comercio ilegal, lo cual genera mayor flujo de suciedad y contaminante atmosféricos (CEPIS@, 2009).

Figura 1. Botadero a cielo abierto.



(CEPIS@, 2009).

Hoy en día, se implementa otra técnica de disposición final de residuos sólidos. Ésta es la de los rellenos sanitarios. Los mecanismo que se utilizan allí, teóricamente garantizan que no haya problemas de salud pública, ni contaminación al ambiente. Aunque realmente lo que se hace con los rellenos sanitarios, es reducir los impactos negativos que genera la disposición final de residuos sólidos.

El relleno sanitario surgió en Estados Unidos hace menos de un siglo, como resultado de la compactación y cobertura de los residuos con equipo pesado. Desde esto, se utilizan técnicas de ingeniería para confinar la basura en áreas lo más estrechas posibles, cubriéndola con tierra y compactándola para ocupar el menor volumen posible.

En el relleno sanitario, se vacía una capa de residuos sólidos y luego se cubre con una capa de arena y otros materiales. Esta última capa debe ser de un espesor aproximado de 40 cm. Después de esto se compacta el terreno y luego se pueden vaciar nuevamente los residuos sólidos para hacer el mismo procedimiento, tantas veces como sea necesario hasta que el relleno sanitario se dé por saturado (CEPIS@, 2009).

Los rellenos sanitarios deben estar compuestos por una depresión en el terreno, que debe ir cubierta por una membrana inferior, un sistema de recolección de líquidos lixiviados, un sistema de recolección de gases y algunas veces de un sistema de cubierta superior.

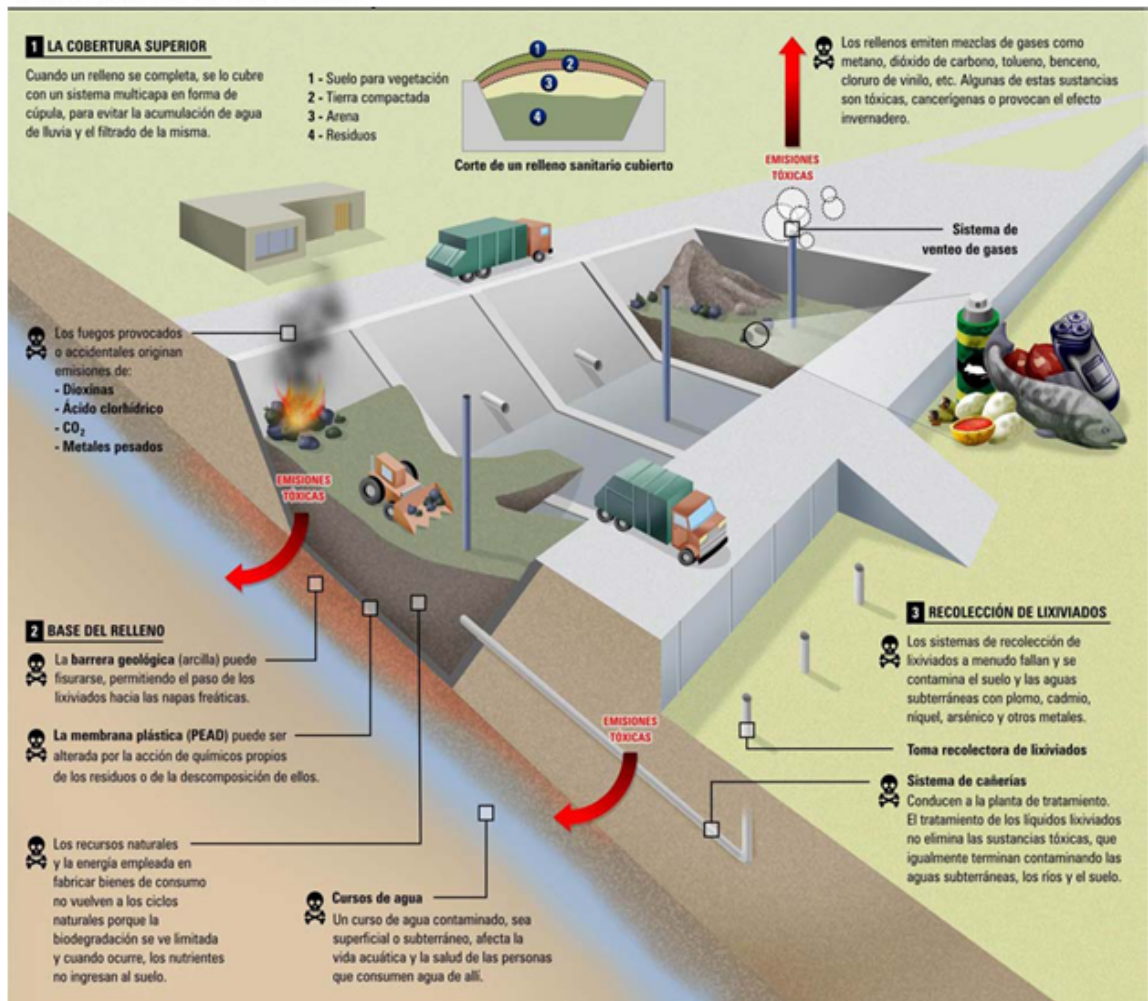
La membrana inferior normalmente es de polietileno de alta densidad, muchas veces esta es reforzada con arcilla, ya que puede ser dañada o alterada por la descomposición de residuos sólidos, lo cual generaría posibles filtraciones de líquidos lixiviados a los suelos (GREENPEACE@, 2008).

El sistema de recolección de líquidos, normalmente consiste en caños posicionados en el fondo del relleno, donde por gravedad los líquidos bajan a una tubería, por la cual se dirigen hacia la planta de tratamiento de líquidos lixiviados, cuando ésta existe. Muchos de los rellenos sanitarios actuales en el mundo, no cuentan con estas plantas.

Con la confinación de los residuos sólidos se generan procesos internos entre los residuos, los cuales pueden causar pequeñas implosiones u otro tipo de reacciones físicas, químicas y biológicas. Para esto, se utilizan unas chimeneas enterradas, las cuales garantizan que las emisiones sean expulsadas al exterior del relleno.

En la Figura 2 se ilustran algunos de los problemas ambientales que pueden darse con los rellenos sanitarios, y aunque algunos son inevitables, pueden ser reducidos de manera considerable con un buen diseño del relleno y una buena administración de éste (GREENPEACE®, 2008).

Figura 2. Contaminación en un relleno sanitario.



(GREENPEACE@, 2008).

Para el diseño y construcción de un relleno sanitario, es indispensable pensar en una cantidad de variables que contribuyan al cuidado del medio ambiente y de las poblaciones cercanas a este, ya que la vida útil del relleno va desde la puesta en marcha hasta muchos años después de haberse llenado por completo. En estos años siguientes, se tiene que garantizar la estabilidad, seguridad, limpieza y otra cantidad de requisitos exigidos para el terreno utilizado. La legislación en

Colombia y el mundo, exige que una vez clausurado el relleno sanitario, debe establecerse una obra ecológica y turística.

### 3.2 DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL ÁREA METROPOLITANA

Uno de los principales problemas encontrados en la gestión de los residuos sólidos urbanos, está relacionada a la producción y tratamiento de los lixiviados producidos. Por esta razón, este capítulo pretende ilustrar la evolución que ha tenido en Área Metropolitana antioqueña la disposición de los residuos sólidos.

#### 3.2.1 Basurero de Moravia.

En 1977, debido a la necesidad de disponer los desechos generados en Medellín en un lugar diferente al río Medellín, se definió en virtud de un Acuerdo Municipal, depositar las basuras en un lote ubicado en el sector de Moravia. En un principio, el objetivo era construir un relleno, pero éste nunca se llevó a cabo, por lo que la basura fue depositada sin ningún tipo de control.

En 1983, la montaña de basura contaba con aproximadamente 40 metros de altura. La zona se convirtió en un foco de contaminación para la ciudad, y el problema se agravó debido al desplazamiento de personas del campo a esta zona. En 1984, el basurero de Moravia fue clausurado, y las Empresas Varias de Medellín, en asocio con otras instituciones crearon el Grupo Recuperar, dando oportunidades de empleo a quienes subsistían de los desechos (EEVV@, 2009).

En el año 2005, la Universidad de Antioquia realizó un estudio para monitorear los gases y los lixiviados del basurero. Los resultados mostraron la presencia de niveles peligrosos de gases y líquidos lixiviados altamente tóxicos, por lo que la zona fue declarada como calamidad pública (G4moravia@, 2007).



### 3.2.2 Relleno Sanitario Curva de Rodas.

Cuando el basurero de Moravia colmó su capacidad para la recepción de residuos, se hizo necesario contar con una nueva alternativa para la disposición de desechos sólidos, por lo que Planeación Departamental contrató en 1978 asesoría para el estudio y diseño de la disposición de residuos.

En 1983, después de analizar cuidadosamente las propuestas de relleno sanitario, incineración y compostación, para la disposición de los residuos sólidos dadas por la empresa contratista, se optó por dar inicio al Relleno Sanitario Curva de Rodas, una vez clausurado el basurero de Moravia.

Figura 3. Relleno Sanitario Curva de Rodas.



(EEVV@, 2009).

El Relleno, contaba con obras e instalaciones tales como cerco en malla, canal de drenaje, vías de acceso, desmonte y descapote del terreno, explanaciones, filtros,

drenajes e impermeabilización. Además contaba con casetas de control de ingreso, de báscula, y de mantenimiento.

El Relleno Sanitario Curva de Rodas convirtió a Medellín en modelo en el manejo de la disposición de basuras, debido a que fue una de las primeras obras de este género en ser construida.

El 23 de noviembre de 1984, comenzó a operar el Relleno, recibiendo durante su primer año aproximadamente 200 mil toneladas de residuos sólidos procedentes de Medellín y tres municipios del Valle de Aburrá.

En el Relleno Curva de Rodas, se desarrolló el Plan de Manejo Ambiental, con el fin de mitigar, compensar y corregir los impactos ambientales generados por la operación de éste. Este plan contaba con proyectos tales como la implementación de un sistema de vigilancia en salud, promoción de la participación ciudadana, manejo de plagas, entre otros.

En el Relleno Curva de Rodas, se destacó el manejo de lixiviado. En un principio se buscó minimizar la producción de dichos líquidos, separando el agua lluvia mediante drenajes subterráneos y superficiales. Estos líquidos eran posteriormente depositados en el alcantarillado.

Sin embargo, debido a su toxicidad, y a las normativas sociales y ambientales, se vio la necesidad de transportar dichos líquidos a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando; lo cual incrementó de manera significativa los costos de operación.

El cierre parcial del relleno Curva de Rodas se empezó a realizar desde 1999, y en el 2003 su cierre fue definitivo.

Para reducir la producción de gases tóxicos provenientes del Relleno Sanitario, en el 2008, Empresas Varias de Medellín, en convenio con la empresa alemana Green Gas Germany y la Universidad de Antioquia, desarrollaron un sistema de quemadores para quemar el biogás generado.

Luego de concluir con el proceso de recuperación de las 40 hectáreas del Relleno Sanitario Curva de Rodas, el sitio podría convertirse en un gran parque natural.

### 3.2.3 Relleno Sanitario La Pradera.

En el 2003, antes de llevar a cabo cierre del Relleno Sanitario Curva de Rodas, Empresas Varias de Medellín, solicitó a Corantioquia Licencia Ambiental para La Pradera, en jurisdicción del municipio de Donmatías.

El Relleno Sanitario la Pradera empezó a operar el 6 de junio del año 2003. La Licencia Ambiental inicialmente fue otorgada para un periodo de operación de máximo 30 meses, como un plan de contingencia para depositar los desechos sólidos del Valle de Aburrá.

En noviembre del 2005, Corantioquia aprobó la solicitud para modificar la licencia ambiental, por la cual el Relleno Sanitario podrá seguir en operación hasta el término de su capacidad.

En La Pradera son depositados 1800 toneladas diarias de desechos sólidos, provenientes de Medellín, y municipios como Barbosa, Bello, Caldas, Cisneros, Guadalupe, La Estrella, Heliconia, Itagüi, El Retiro, Guadalupe, Rionegro, Sabaneta, Salgar, Venecia, Fredonia, Girardota, Copacabana, Carolina, Guarne, Yolombo, Guarne, Titiribí y Gómez Plata.

Figura 4. Relleno Sanitario La Pradera.



(EEVV@, 2009).

El Relleno Sanitario La Pradera cuenta con un terreno de 354 hectáreas, y cuenta con grandes concavidades naturales que pueden ser aprovechadas para la disposición final de los residuos.

La infraestructura de La Pradera, cuenta con las siguientes instalaciones:

- Puente sobre estructura metálica con capacidad de carga superior a las 60 toneladas.
- Sistema interno de vías pavimentadas.
- Sistema de pesaje conformado por dos básculas, con sistema electrónico incorporado y un software que procesa la información de inmediato.

- Planta de energía con capacidad para 300 KVA con red trifásica y subestación de energía que garantiza el funcionamiento del sistema.
- Instalaciones para el personal administrativo de la empresa y contratistas.
- Diversas áreas para la disposición final de residuos, aprovechables en un desarrollo secuencial del proyecto a largo plazo.

#### 3.2.4 Centro Industrial del Sur – CIS.

El Centro Industrial del Sur, El Guacal, se creó con la fundación de EVAS ENVIAMBIENTALES S.A. E.S.P., una empresa de servicios públicos de aseo y complementarios.

El CIS es un centro para el tratamiento y disposición final de residuos, que empieza a operar en el 2006 y que busca disminuir el impacto ambiental. El Guacal, es un relleno sanitario, con enfoque industrial, que busca la gestión integral de los desechos sólidos, y cuenta con licencia ambiental por 24 años.

El CIS El Guacal, cuenta con dos vasos para la disposición final de residuos sólidos, los cuales tienen capacidad para 1'700.000 toneladas y 7'200.000 toneladas respectivamente. Actualmente sólo hay un vaso en funcionamiento que cuenta con aproximadamente 600 mil toneladas de desechos.

El relleno sanitario cuenta con chimeneas distribuidas a través de las cuales el gas metano sale al ambiente.

El Centro Industrial del sur, CIS, cuenta dentro de sus instalaciones con una serie de procesos como lo son el pesaje, la planta de separación de residuos, la planta de compactación y la planta de tratamiento de lixiviados.

- Pesaje.

A la entrada del Centro Industrial, se cuenta con una báscula digital que tiene una capacidad de 80 toneladas, y la cual cuenta con un estricto plan de mantenimiento que asegura la buena calibración, y a su vez la buena facturación de los residuos recibidos. Una vez pesados, los vehículos pasan a depositar los residuos a la planta de separación.

Figura 5. Ingreso Centro Industrial del Sur. Pesaje.



(E.S.P@, 2009).

- Planta de separación y tratamiento de residuos orgánicos.

Con el fin de disminuir la cantidad de desechos que se depositan en El Guacal, se cuenta con una planta en la cual personal capacitado se encarga, según lo planeado, de separar los residuos orgánicos, inorgánicos e inservibles.

De esta manera, la idea diseñada es la de separar los residuos que pueden ser reciclados y reincorporados al ciclo productivo, como plástico, vidrio, papel y metal; de los residuos orgánicos que pueden ser transformados en abono; y de los residuos inservibles que van al relleno sanitario para ser compactados.

La empresa que se encarga actualmente de realizar esta labor es Etacol, quien además se encarga de vender el material reciclado. Es de anotar que en la realidad operativa, por diversas razones, los procesos de separación y de recuperación se aplican parcialmente. Sin embargo, la empresa EVAS quiere tomar el control de esta situación, y planea separar 50 toneladas diarias de plástico para la producción de diesel, 100 toneladas de chatarra, aluminio y otros metales para el reciclaje, y utilizar los residuos orgánicos para la producción de etanol, que se utilizaría en el mismo Centro Industrial.

Figura 6. Planta de separación de residuos, El Guacal.



(E.S.P@, 2009).



- Planta de lixiviados.

Todos las aguas residuales, percolados y lixiviados de los procesos de descargue, enfardado, compostaje y disposición final son trasladados a través de canales, filtros y conductos hasta una planta de depuración la cual consta de siete sistemas de tratamiento entre físicos, físico-químicos, biológicos aeróbicos y anaeróbicos con los cuales se supera una remoción del 95% de los contaminantes (E.S.P@, 2009). En este sentido es importante contrastar esta información con el comportamiento continuo de la planta de tratamiento bajo situación real operativa, evaluada en períodos de lluvia y de tiempo seco. Esta información no es en la actualidad del dominio público.

Figura 7. Planta de tratamiento de lixiviados.



(E.S.P@, 2009).



### 3.3 ORÍGENES DE LOS LIXIVIADOS

Los residuos sólidos, principalmente los orgánicos, una vez que son compactados por maquinaria pesada liberan líquidos orgánicos y agua, que se filtra a través de los desechos arrastrando minerales y nutrientes, hasta llegar a la base del relleno. A su vez, el agua lluvia que caiga al relleno podrá percolar también a través de los residuos arrastrando y diluyendo consigo sólidos en suspensión, sólidos solubles y compuestos orgánicos, aumentando el flujo de este líquido. Esta mezcla, de gran potencial contaminante, es lo que conocemos como lixiviados o líquidos percolados.

### 3.4 GENERACIÓN DE LOS LIXIVIADOS

La cantidad de lixiviado producido por un relleno sanitario depende fundamentalmente de algunos factores que se anuncian más adelante. Antes es importante decir que una forma de estimar la cantidad de lixiviados que se van a producir es mediante un balance de agua, es decir, la sumatoria de toda el agua que entra al relleno sanitario menos la que sale será el volumen de lixiviado producido.

En la mayoría de los rellenos sanitarios, el lixiviado está formado por el líquido que entra desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos), y en su caso el líquido producido por la descomposición de los residuos, si hay. Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos.

Como se mencionó anteriormente, la generación de los lixiviados depende en gran medida de diferentes factores, tales como lo son:

- Precipitación (P)

- Agua superficial (AS)
- Penetración de agua subterránea (PA)
- Irrigación (Ir)
- Descomposición del residuo (D)
- Residuos líquidos y fangosos (RLF)
- Evaporación (E) y evapotranspiración (ET)
- Escorrentía superficial (ES)
- Infiltración (I)
- Retención de la humedad ( $\Delta RHs$  y  $\Delta RHr$ )
- Percolación (PEs y PEr)

La cantidad que se genera de un lixiviado en un rellenos sanitario puede presentarse como un balance hídrico general, siendo diferente para un relleno activo o en funcionamiento que para un relleno ya clausurado, como se muestra a continuación (AL-MEFLEH, 2003, pp. 17 -21).

Para un relleno en funcionamiento,

$$L = (P + AS + Ir + D + RLF + PA) - (E + ES + \Delta RHs + \Delta RHr)$$

Para un relleno clausurado,

$$L = (P + AS + PA) - (E + ET)$$

Algunos de estos parámetros sin embargo, son difíciles de medir, tales como lo son la descomposición, la infiltración y la escorrentía, por lo que la utilización de estas expresiones no es más que una aproximación a la realidad.

Estos parámetros están más ligados a las condiciones meteorológicas del lugar, pero existen otras condiciones que dependen de otros parámetros, como lo son:

- Condiciones de operación
- Conformación de celdas
- Cobertura de celdas
- Grado de compactación
- Maquinaria usada
- Características del material de cobertura
- Naturaleza de la basura
- Tipo de basura
- Humedad
- Contenido de materia orgánica
- Características de los desechos
- Calidad y cantidad de reciclaje
- Costumbres de los usuarios

### 3.5 COMPOSICIÓN DE LOS LIXIVIADOS

Los lixiviados son producto de la descomposición de los residuos orgánicos y de la filtración del agua lluvia a través de los desechos, la cual arrastra a su paso sólidos en suspensión. Por lo cual, su composición y concentración, se encuentran estrechamente relacionadas con la composición de los desechos que se encuentren en el relleno sanitario.

La composición de los lixiviados varía mucho de acuerdo a algunos parámetros como lo son la edad del relleno sanitario, el tipo de desechos que allí se dispongan, las precipitaciones de la región donde se encuentre el relleno y el clima del lugar, el grado de compactación de los residuos; por lo que se hace difícil determinar una composición estándar de los lixiviados.

Los lixiviados procedentes de los rellenos sanitarios, por lo general se encuentran compuestos de sustancias químicas, producto de la descomposición de la materia orgánica, y metales.

Los parámetros que caracterizan un lixiviado son:

- Físicos: como la concentración de sólidos suspendidos, pH y conductividad.
- Químicos: como las concentraciones de materia orgánica degradable química o biológicamente, nitratos, fosfatos, cloruros, metales. Las concentraciones altas de metales pesados así como de nitrógeno amoniacal y de algunos compuestos orgánicos, pueden ser tóxicas o inhibir el crecimiento de microorganismos.
- Biológicos: según el tipo y cantidad de microorganismos presentes.

De acuerdo a la edad del relleno sanitario, los lixiviados pueden clasificarse en Jóvenes y Maduros. Los lixiviados Jóvenes son aquellos procedentes de vertederos que tienen menos de dos años de funcionamiento, y los Maduros son aquellos lixiviados provenientes de los vertederos con más de diez años de funcionamiento.

Por ejemplo, si se recoge una muestra de los lixiviados jóvenes, durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de  $\text{DBO}_5$ , COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra del lixiviado maduro, durante la fase de fermentación del metano el pH estará en el rango de 6.6 a 7.5 y los valores de concentración de  $\text{DBO}_5$ , COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados porque la mayoría de los metales son menos solubles para valores de pH neutros. El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes,

sino también de la presión parcial del CO<sub>2</sub> en el gas del relleno sanitario que está en contacto con él (ROA, 2006).

De acuerdo a esta clasificación, Jóvenes y Maduros, los lixiviados presentan distintas concentraciones de los componentes como se ilustra a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición media de un lixiviado joven y maduro.

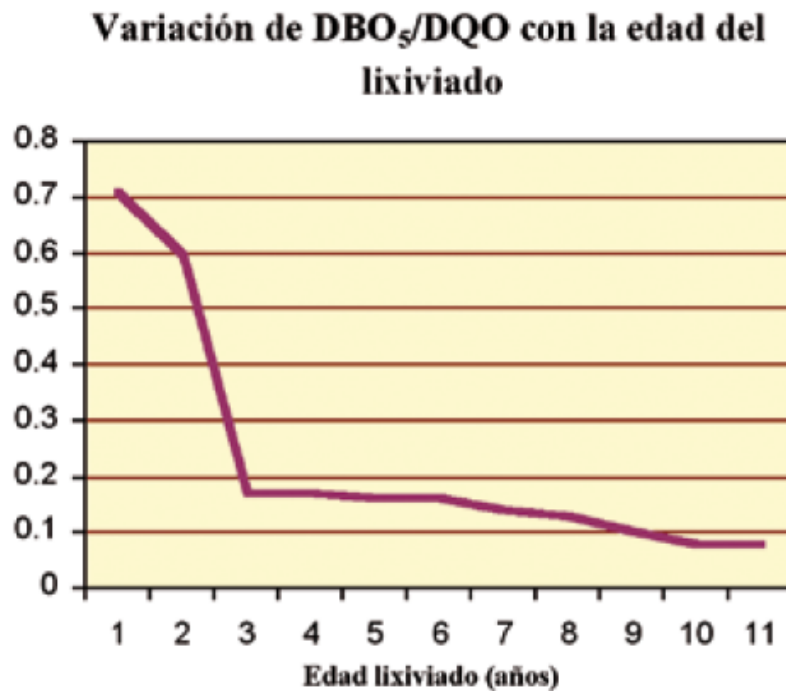
Parámetro	Lixiviado Joven (mg/L)	Lixiviado Maduro (mg/L)
pH	4,5-7,5	6,6-7,5
DBO <sub>5</sub>	2.000-30.000	100-200
DQO	3.000-60.000	100-500
COT	1.500-20.000	80-160
NH <sub>4</sub> -N	10-800	20-40
SS	200-2.000	100-400
Cloro	200-3.000	100-400
SO <sub>4</sub>	50-1.000	20-50
Ca	200-3.000	100-400
Mg	50-1.500	50-200
Fe	50- 1.200	20-200

(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

Debido a la diferente composición de los lixiviados, que dependerá de la edad del relleno, cambiarán las tecnologías a emplear o los parámetros para diseñar una planta de tratamiento de lixiviados.

La biodegradabilidad de los lixiviados tiende a disminuir a medida que aumenta la edad del relleno, de acuerdo a la relación  $DBO_5/DQO$ , (Véase Figura 8), por lo que los tratamientos biológicos, tienden a ser menos efectivos en lixiviados viejos.

Figura 8. Variación del índice de biodegradabilidad con la edad del lixiviado.



(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

### 3.6 EFECTOS DE LOS LIXIVIADOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Los lixiviados son inevitablemente un problema que afecta a todos los medios. Desde las industrias que contaminan las aguas que utilizan, hasta la contaminación que generan las aguas residuales domésticas. Inclusive los seres

humanos contribuyen a la formación de estos líquidos lixiviados, con los líquidos que producen.

Pero el mayor problema se ve en los rellenos sanitarios, donde los lixiviados son producto de la descomposición natural de los residuos sólidos con las aguas que logran penetrarlos.

Estos líquidos son fáciles de reconocer por su color negro y su fuerte olor maloliente. Y a pesar que no se generan flujos muy altos, estos líquidos son altamente contaminantes, debido a sus altas concentraciones de contaminantes orgánicos y nitrógeno amoniacal. Esto último puede generar problemas de salud para las personas que tengan algún tipo de contacto, ya sea por ingestión o por irritación con contacto con la piel.

Dentro de los impactos negativos de los líquidos están:

- Los fuertes olores, los cuales pueden afectar la fauna, flora y la salud de los seres humanos que estén cerca de éstos
- El fuerte vapor que emanan estos líquidos al igual que los olores, afectan a la fauna flora y a los seres humanos, de forma tal que por ejemplo las plantas que estén a su alrededor quedan casi sin vida.
- El mayor problema generado por los lixiviados, es la contaminación de los suelos una vez son penetrados por los líquidos, ya que se puede ocasionar contaminación en los sembrados y en las aguas subterráneas, recurso de gran importancia para el abastecimiento de agua.
- Un gran impacto paisajístico.

El contenido de los líquidos lixiviados varía según las condiciones climáticas, la vejez del relleno sanitario, las precipitaciones en las áreas de influencia y las sustancias presentes en éstos. Muchas veces los rellenos sanitarios contienen sustancias peligrosas, y aunque no estén permitidas muchas de esas sustancias,

es casi imposible detectarlas entre todas las toneladas diarias de basura que entran en un relleno sanitario.

Algunas de las sustancias son:

- Detergentes para lavar ropa, quitamanchas y otros productos conteniendo solventes pueden poseer tricloroetileno, benceno, tolueno y cloruro de metileno.
- La naftalina contiene diclorobenceno.
- El esmalte para uñas puede contener xileno, dibutilftalato y tolueno.
- Los plásticos usados normalmente pueden contener cloruro de vinilo, polietileno, formaldehído y tolueno.

También pueden encontrarse metales pesados en los desechos urbanos como lo son:

- Los productos electrónicos (Televisores, equipos de video, teléfonos, etc.), el vidrio, las cerámicas, los plásticos, los materiales de bronce y los aceites usados pueden contener plomo.
- Las baterías de níquel-cadmio, los plásticos, los productos electrónicos, el lavavajillas, el lavarropas, los pigmentos, el vidrio, las cerámicas, los aceites usados y el caucho contienen cadmio.
- Las baterías, las lámparas fluorescentes, los restos de pinturas, los termómetros, los pigmentos de tintas y los plásticos pueden contener mercurio.
- Los denominados Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) contienen mezcla compleja de cientos de materiales, muchos de los cuales contienen metales pesados tales como plomo, mercurio, cadmio y berilio, químicos peligrosos, tales como los retardantes de fuego bromados, bifenilos polibromados (PBBs), difenil éter polibromados (PBDEs) y tetrabromobisfenol, A (TBBPA o TBBA). El plástico PVC es un compuesto



también muy utilizado. Un teléfono celular móvil, por ejemplo, contiene entre 500 y 1.000 compuestos diferentes (GREENPEACE@, 2008).

Al depositarse estos residuos en los rellenos, estos reaccionan y se producen los gases y los líquidos lixiviados. Dependiendo del contenido de los líquidos, éstos pueden afectar la salud de los habitantes cercanos a los rellenos de maneras diferentes. Sin embargo hay tres tipos de sustancias que son las más encontradas en los rellenos sanitarios. Estas sustancias son:

- Compuestos orgánicos volátiles: éstos son formados por átomos de hidrógeno y carbono que se evaporan fácilmente. La Tabla 2 detalla los compuestos orgánicos volátiles más comunes de encontrar en los líquidos lixiviados, y sus efectos en la salud humana.

Tabla 2. Compuestos orgánicos volátiles en lixiviados y efectos en la salud.

COMPUESTO ORGÁNICO VOLATIL	EFFECTOS EN LA SALUD
Benceno	Cancerígeno, mutagénico, posible teratogénico; efectos sobre el sistema nervioso central y periférico; efectos sobre el sistema inmunológico y gastrointestinal; desórdenes en las células de la sangre; alergias; irritaciones en los ojos y la piel.
Cloroformo	Probable cancerígeno y teratogénico; efectos sobre el sistema nervioso central y efectos gastrointestinales; daños en el hígado y el riñón; embriotóxico; irritaciones en los ojos y la piel.
1,1-dicloroetano	Embriotóxico; efectos sobre el sistema nervioso central, hígado y riñones.
Etilbenceno	Efectos sobre el sistema nervioso central; daños en los riñones y el hígado; irritaciones en el sistema respiratorio, en los ojos y la piel.

Tabla 2. (Continuación)

Cloruro de metileno	Posible cancerígeno; efectos sobre el sistema nervioso central, pulmones sistema respiratorio y sistema cardiovascular; desórdenes en la sangre; irritaciones en la piel y los ojos.
Tetracloroetileno	Probable cancerígeno; efectos sobre el sistema nervioso central, pulmones sistema respiratorio; embriotóxico; daños en los riñones e hígado; irritaciones al sistema respiratorio y los ojos.
Tolueno	Posible mutagénico y cancerígeno; efectos sobre el sistema nervioso central y sistema cardiovascular; daños en los riñones y el hígado; irritaciones al sistema respiratorio, la piel y los ojos; alergias.
Tricloroetileno	Posible cancerígeno y teratogénico; efectos en el sistema nervioso central, riñones e hígado, sistema cardiovascular, pulmones/sistema respiratorio; desórdenes en las células de la sangre; irritaciones en el sistema respiratorio, la piel y los ojos; alergias.

(GREENPEACE @, 2008).

- Metales: debido al carácter ácido de los líquidos lixiviados, estos son disueltos y transportados. La Tabla 3 muestra los metales que pueden estar presentes y sus efectos en la salud humana.

Tabla 3. Metales presentes en líquidos lixiviados y efectos en la salud.

METALES	EFFECTOS EN LA SALUD
Arsénico	Cancerígeno; potencialmente teratogénico; efectos sobre los sistemas cardiovascular, nervioso periférico, reproductivo y pulmones / respiratorio; daños en el hígado y el riñón.
Cadmio	Probable cancerígeno y teratogénico; embriotóxico; efectos en el sistema nervioso central, sistema reproductivo y sistema respiratorio-pulmones; daños en el riñón.

Tabla 3. (Continuación)

Cromo	Cancerígeno; probable mutagénico; efectos sobre el sistema pulmonar - respiratorio; alergias, irritación en los ojos.
Mercurio	Teratogénico; efectos sobre el sistema nervioso central, cardiovascular y pulmonar-respiratorio; daños en riñón y la vista.
Níquel	Probable cancerígeno; probable teratogénico; efectos sobre el sistema pulmonar-respiratorio; alergias; irritación en el ojo y la piel; daños en el hígado y el riñón.
Plomo	Probable teratogénico; daños en el riñón y el cerebro; efectos sobre el sistema nervioso central y reproductivo; desórdenes en las células de la sangre.

(GREENPEACE@, 2008).

- Compuestos orgánicos sintéticos o alcoholes: en las Tablas 4 y 5 se enumeran las sustancias químicas y los efectos en la salud humana y los alcoholes y los efectos en la salud humana.

Tabla 4. Compuestos orgánicos sintéticos presentes en los líquidos lixiviados y sus efectos en la salud.

COMPUESTO	EFFECTOS EN LA SALUD
2,4-D	Mutagénico, posible cancerígeno y afecta los nervios y en el sistema reproductor; efectos pulmonares / sistema respiratorio; irritación en la piel y los ojos.
Lindano	Daños en el sistema reproductor y nervioso; posible cancerígeno.
Pentaclorofenol	Posible mutagénico y teratogénico, irritación en los ojos, la piel y en los pulmones / sistema respiratorio; daños en el hígado y el riñón.

(GREENPEACE@, 2008).

Tabla 5. Alcoholes encontrados en líquidos lixiviados y sus efectos en la salud.

ALCOHOL	EFFECTOS EN LA SALUD
Etanol	Mutagénico; cancerígeno; causa de malformaciones congénitas
1-propanol	Posible cancerígeno
2-propanol	Posible cancerígeno; irritación en la piel, los ojos y en el sistema respiratorio; posibilidad de generar efectos en el sistema nervioso central
4-nitrofenol	Posible mutagénico y cancerígeno; desórdenes en las células de la sangre; irritación en la piel y el sistema respiratorio; efectos en el sistema nervioso central.

(GREENPEACE@, 2008).

### 3.7 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS Y LIXIVIADOS EN COLOMBIA

La generación de lixiviados crece en todo el mundo a medida que pasa el tiempo. Tanto en América, Asia, Australia, África y Europa, los índices de estos líquidos han crecido en los últimos años ampliamente. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, el volumen total de residuos generados en Europa aumenta año tras año. También se habla de un gran aumento de estos líquidos en Estados Unidos y Australia.

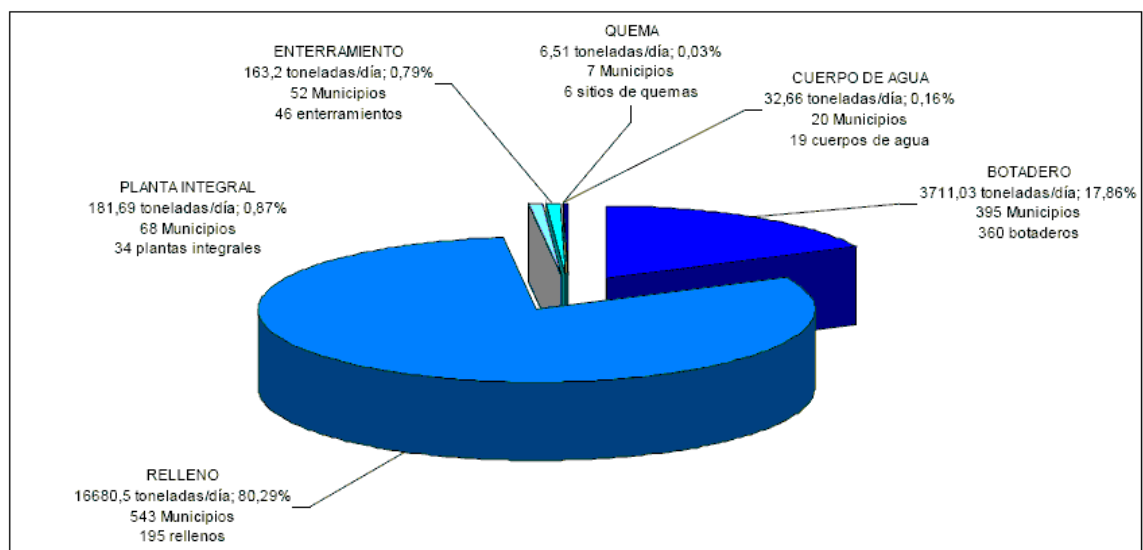
Colombia no se queda atrás. Con base en los datos reportados por los prestadores del servicio de aseo al Sistema Único de Información SUI, se pudo determinar que en Colombia se generan aproximadamente 25.079 toneladas diarias de residuos, de las cuales 23.000 son dispuestas en rellenos sanitarios o plantas integrales de tratamiento de residuos sólidos.

Para el año 2008, los residuos sólidos eran dispuestos en 254 rellenos sanitarios, de los cuales 43 son regionales y 59 plantas integrales de residuos sólidos, donde

acuden 751 municipios del país. Esta información sólo tiene en cuenta los depósitos que cuentan con los permisos pertinentes (SUI@, 2007).

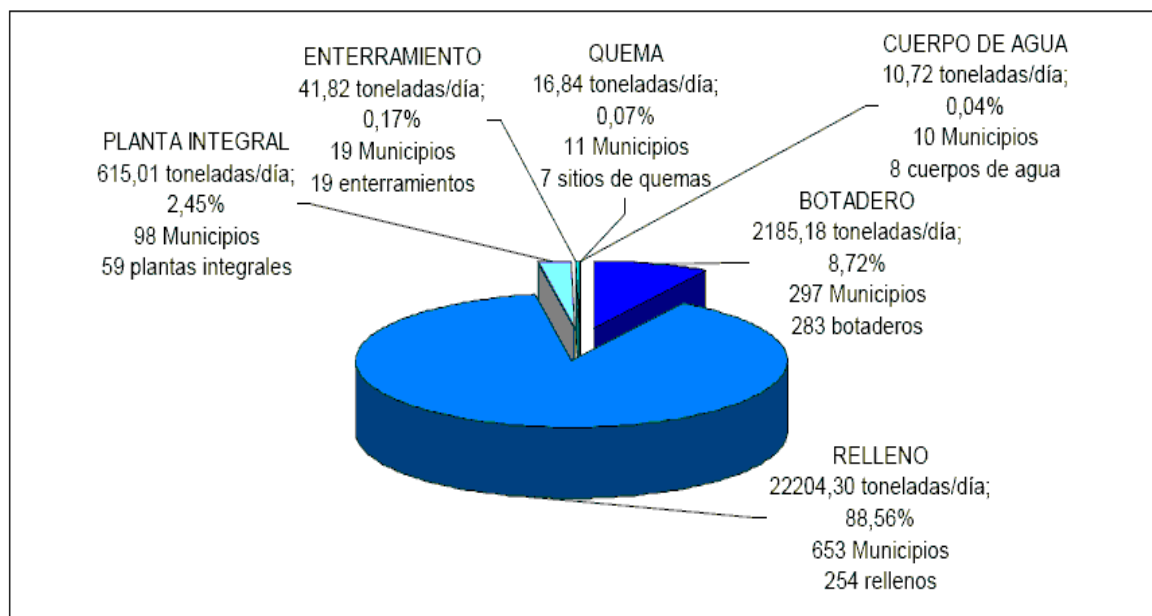
En las Figuras 9 y 10 se muestra el aumento de disposición de los residuos sólidos en rellenos sanitarios del año 2006 al 2007.

Figura 9. Sistema de disposición final año 2006.



(SUI@, 2007)

Figura 10. Sistema de disposición final año 2006.



(SUI@, 2007).

#### 4. LEGISLACIÓN PARA EL MANEJO Y TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS

El creciente deterioro medioambiental, el cambio climático y la contaminación de suelos, aguas y aire, causados por las acciones humanas, han obligado a los gobiernos de todo el mundo a crear políticas de protección, normas y legislaciones que ayuden a preservar y conservar el medio ambiente.

Existen en especial normas que ayudan a prevenir y a mitigar la contaminación causada por los lixiviados que se generan en los rellenos sanitarios.

##### 4.1 LEGISLACIÓN EN COLOMBIA

En Colombia, el *Decreto 838 de 2005 por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones*, dicta los requerimientos específicos que se deben tener en cuenta a la hora de tratar los lixiviados.

A continuación se destacan sólo algunos artículos y puntos de este decreto que contienen información puntual sobre el tema de lixiviados.

Artículo 10. *Criterios operacionales*. La persona prestadora del servicio público de aseo en la actividad complementaria de disposición final, deberá garantizar, entre otras, el cumplimiento de las siguientes condiciones durante la fase de operación:

10. Condiciones establecidas en el permiso de vertimiento para la descarga, directa e indirecta, del efluente del sistema de tratamiento de lixiviados, en los cuerpos de agua, tanto subterránea como superficial.

Artículo 11. *Del control y monitoreo en el área de disposición final de residuos sólidos*. Todo prestador del servicio público de aseo en la actividad

complementaria de disposición final de residuos sólidos, deberá incluir en los diseños correspondientes la red de monitoreo de aguas subterráneas, la identificación de las fuentes superficiales y los puntos donde se realizará el control y monitoreo, sin perjuicio de lo dispuesto en la licencia ambiental.

Asimismo, dicho prestador deberá incluir en los diseños correspondientes los sitios donde se realizará el control de cada actividad para los siguientes parámetros:

- Control y monitoreo de la calidad del recurso agua, como mínimo, de acuerdo con los siguientes parámetros y frecuencia, sin perjuicio de lo que disponga la autoridad ambiental.

Tabla 6. Lixiviados y calidad del vertimiento a fuentes superficiales.

Parámetros	Frecuencia	
	Mayor de 15 TM/día	Menor o igual a 15 TM/día
pH	Semestral	Anual
Oxígeno disuelto	Semestral	Anual
Metales pesados	Semestral	Anual
DQO	Semestral	Anual
DOB <sub>5</sub>	Semestral	Anual
SST	Semestral	Anual

(MAVDT@, 2005)

Además de las fuentes superficiales y lixiviados, se deberá caracterizar las aguas provenientes del sistema de drenaje, para corroborar que no existe contacto con lixiviados.



En el evento en que la autoridad ambiental encuentre que las medidas establecidas en la licencia ambiental respectiva no se han ejecutado, podrá incrementar el seguimiento y control en las frecuencias que considere necesarias, con cargo al prestador (MAVDT@, 2005).

Además, si los lixiviados son provenientes de residuos sólidos peligrosos, deberá tenerse en cuenta lo dispuesto en el *Decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*.

#### 4.2 LEGISLACIÓN EN EL MUNDO

Los gobiernos del mundo, al igual que en Colombia, también tienen legislaciones y normas que ayudan a prevenir los daños medioambientales causados por la generación y mal manejo de los lixiviados. A continuación, se mencionan algunas de las normatividades sobre el tema a nivel mundial.

- Unión Europea.

La Unión Europea establece requisitos técnicos estrictos para los residuos y los vertidos con el objetivo de prevenir o reducir los efectos ambientales negativos causados por el vertido de residuos.

En la *Directiva 1999/31/CE* del Consejo de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos, en el Anexo 2 se hacen notar los siguientes puntos:

##### 2. Control de aguas y gestión de lixiviados

Se tomarán las medidas oportunas con respecto a las características del vertedero y a las condiciones meteorológicas, con objeto de:

- Controlar el agua de las precipitaciones que penetre en el vaso del vertedero,
- Impedir que las aguas superficiales o subterráneas penetren en los residuos vertidos,
- Recoger las aguas contaminadas y los lixiviados. Cuando una evaluación basada en la ubicación del vertedero y los residuos que se admitan muestre que el vertedero no es potencialmente peligroso para el medio ambiente, la autoridad competente podrá decidir que no se aplique esta disposición,
- Tratar las aguas contaminadas y los lixiviados recogidos del vertedero de forma que cumplan la norma adecuada requerida para su vertido.

Lo arriba dispuesto puede no aplicarse a los vertederos para residuos inertes.

### 3. Protección del suelo y de las aguas.

3.1. Todo vertedero deberá estar situado y diseñado de forma que cumpla las condiciones necesarias para impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de los lixiviados en las condiciones establecidas en el punto 2. La protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas de superficie se realizará mediante la combinación de una barrera geológica y un revestimiento inferior durante la fase activa o de explotación, y mediante la combinación de una barrera geológica y un revestimiento superior durante la fase pasiva o posterior a la clausura.

3.2. Existe barrera geológica cuando las condiciones geológicas e hidrogeológicas subyacentes y en las inmediaciones de un vertedero tienen la capacidad de atenuación suficiente para impedir un riesgo potencial para el suelo y las aguas subterráneas.

3.3. Además de las barreras geológicas anteriormente descritas deberá añadirse un sistema de impermeabilización y de recogida de lixiviados, de manera que se garantice que la acumulación de lixiviados en la base del vertedero se mantiene en un mínimo (EUR LEX@, 1999).

- ESTADOS UNIDOS.

En Estados Unidos, la EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, es la encargada de proteger la salud de los humanos y la del medio ambiente, y para lograrlos se encargan de escribir las regulaciones mediante las cuales deberán regirse los individuos, empresas, gobiernos estatales o locales, instituciones sin fin de lucro y otros.

En el *Capítulo 288*, del Código de Pensilvania, que habla sobre los vertederos de residuos sólidos, hay una serie de códigos, donde se habla sobre los requerimientos adicionales a la operación del relleno, referentes al tratamiento de los lixiviados (Commonwealth of Pennsylvania@, 2001).

*Requerimientos adicionales de operación – Tratamiento de lixiviados*

288.452. Métodos básicos de tratamiento.

a. Salvo que se diga lo contrario en esta sección, los lixiviados se recogen y se manipulan por descarga directa a un sistema de tratamiento público permitido, después de haberle realizado un pre-tratamiento, si éste es requerido por las autoridades federales, leyes estatales o locales, o por descargarse en otro centro de tratamiento autorizados.

b. Los lixiviados pueden ser recogidas y manipuladas en la planta de tratamiento en el sitio y la descarga en una corriente receptora con un permiso expedido por el Departamento cumpliendo con la Ley de Arroyos Limpios y su Regulación, siempre y cuando el Departamento apruebe este método en el permiso.

c. Los lixiviados podrán ser recogidos y manipulados por riego por aspersión después del tratamiento. Este método no se permitirá a menos que, como mínimo, apliquen las siguientes condiciones:

1. La descarga en un tratamiento de propiedad pública u otras instalaciones autorizadas de tratamiento no es viable.

2. La descarga de los lixiviados tratados en una corriente receptora de una manera compatible con la Ley de Arroyos Limpios y su Regulación no puede alcanzarse.

3. El riego por aspersión no causará polución de agua o aire.

d. Si el lixiviado es peligroso, debe ser manejado de acuerdo al Artículo VII (relacionado con el manejo de residuos peligrosos).

#### 288.453. Transporte de lixiviados.

a. Durante los primeros 3 años después de la descarga inicial de lixiviados en el sistema de recogida y manipulación, los lixiviados pueden ser transportados en vehículos, hasta una instalación de tratamiento fuera del sitio, para su tratamiento.

b. El transporte vehicular de los lixiviados a una planta de tratamientos fuera del sitio no se permitirá a menos que se cumplan los siguientes requisitos:

1. Antes de la eliminación de los residuos en la instalación, el operador ha puesto en marcha en el lugar un sistema permitido y en pleno funcionamiento para el pre-tratamiento de los lixiviados plenamente conforme a los requisitos aplicables de pre-tratamiento de las plantas de tratamiento primario y de respaldo fuera del sitio.

2. Uno de los siguientes aplica:

- i. La descarga directa en una obra de tratamiento de propiedad pública u otras instalaciones autorizadas de tratamiento se puede alcanzar dentro de 3 años.
- ii. La descarga de lixiviados tratados en una corriente receptora de acuerdo con la Ley de Arroyos Limpios y su Regulación se puede alcanzar dentro de 3 años.

3. Un sistema de recirculación está construido y en pleno funcionamiento.

4. La entidad que opera el relleno sanitario tiene un contrato válido para el tratamiento de lixiviados en una planta de tratamiento fuera del sitio para un máximo de 3 años. El contrato deberá prohibir que el operador de la planta de tratamiento se niegue a tratar los lixiviados sin previo aviso (6 meses) por escrito a la entidad explotadora del vertedero.

5. La planta de tratamiento fuera del lugar al que los lixiviados se transportarían está funcionando de acuerdo con la Ley de Arroyos Limpios y su Regulación, y está autorizada y capaz de aceptar y tratar los lixiviados del relleno sanitario.

c. Si el operador pierde la capacidad de disponer en la instalación y es incapaz de asegurar un tratamiento fuera de la instalación aceptable para el Departamento dentro de 15 días a partir de la pérdida de su planta de tratamiento aprobado, la aplicación del plan de tratamiento requerido se iniciará de inmediato.

d. Si el operador no puede implementar inmediatamente un plan de tratamiento de lixiviado para cumplir con la Ley de Arroyos Limpios y su Regulación, y no puede localizar una instalación alternativa de tratamiento fuera del sitio con 15 días, el operador dejará de aceptar los residuos en la instalación de almacenamiento, transformación o eliminación. La cesación continuará hasta que el operador obtenga un medio aceptable de tratar los lixiviados generados en la instalación.

e. Como otra disposición de este subcapítulo, el operador deberá establecer, en el lugar un sistema permitido y en pleno funcionamiento para el tratamiento total de los lixiviados por lo menos 3 años antes del cierre de la instalación.

#### 288.454. Recirculación de lixiviados.

a. En conjunto con los métodos de tratamiento y el transporte de lixiviados, la recirculación de los lixiviados generados en la instalación pueden ser utilizados si existe lo siguiente:

1. La zona de recirculación de lixiviados ha sido previamente llenada de desechos sólidos.
2. Existe suficiente capacidad de residuos para absorber los lixiviados.
3. El área sujeta a la recirculación de lixiviados está sustentada por un sistema de recogida de lixiviados.
4. La recirculación de los lixiviados se realiza con un sistema de tuberías autorizados situados bajo la cubierta intermedia, y no causa olores, escorrentías o encharcamiento.
5. El lixiviado no es un residuo peligroso.

b. Una alternativa de método de recirculación de lixiviados puede ser usada si es aprobada por el Departamento.

#### 288.455. Recolección y almacenamiento de lixiviados.

a. Embalses o tanques para el almacenamiento de los lixiviados antes o durante el tratamiento se construirán de acuerdo con los códigos sobre los depósitos de almacenamiento; requisitos generales, y fracaso.

b. Un sistema en el sitio de almacenamiento de lixiviados formará parte de cada método de tratamiento de lixiviados utilizados por el operador. El sistema de almacenamiento deberá contener embalses o tanques para el almacenamiento de los lixiviados. Para las instalaciones que no sean de cautiverio, los tanques o embalses tendrán una capacidad de almacenamiento por lo menos igual a la producción máxima esperada de lixiviados por un período de 30 días para la vida de la instalación estimadas en el plan de tratamiento de lixiviados. Para instalaciones de cautiverio, el depósito o embalse tendrá capacidad de almacenamiento suficiente para garantizar el funcionamiento adecuado de la planta de tratamiento de acuerdo con el plan de tratamiento de lixiviados aprobado y deberá satisfacer las normas de rendimiento en el del sistema de recogida de lixiviados dentro de la cubierta de protección. No más del 25% de la capacidad de almacenamiento de lixiviados total puede ser utilizada para igualar el flujo sobre una base regular.

c. Los embalses o tanques deberán ser aireados como sea necesario para prevenir y controlar los olores. Embalses o tanques tendrán cada uno una capacidad de al menos 250.000 galones, a menos que otra cosa sea aprobada por el Departamento.

d. La capacidad de almacenamiento de presas y tanques en un sitio se incrementará, en caso de que almacenamiento adicional sea requerido, antes de cada fase principal de la construcción y si es necesario lo contrario.

e. La capacidad de almacenamiento de lixiviados puede no considerar la inclusión de los lixiviados que se hayan quedado en, o sobre el sistema de revestimiento.

f. La recogida y los sistemas de contención que sean necesarios deben ser instalados antes de la deposición de los residuos sólidos en el sitio. El tratamiento de lixiviados o sistema de manejo aprobados por el Departamento debe ser

instalado o estar listo para su uso antes del almacenamiento o disposición final de residuos sólidos en el sitio.

g. Para las áreas permitidas a partir del 13 de enero 2001, todas las tuberías subterráneas utilizadas para el transporte de los lixiviados del sistema de revestimiento de embalses de almacenamiento de los lixiviados o de los depósitos, deberán estar provistos de un envase secundario o el cumplimiento de los requisitos establecidos en el código 245.445 (relativo a los métodos para la detección de la liberación de tubería). La contención secundaria deberá estar diseñada, construida e instalada para dirigir cualquier tipo de liberación a un área que puede ser inspeccionado por fugas.

#### 288.456. Análisis y tratamiento de lixiviados de lodos.

a. Una vez iniciado el flujo de lixiviados de la instalación, el operador deberá tomar muestras, analizar y mantener un registro de lo siguiente:

1. Sobre una base diaria, el caudal medio y el volumen de lixiviados del vertedero que fluye en el almacenamiento de los lixiviados y sistema de tratamiento.
2. En términos trimestrales, a menos que se especifique lo contrario en el permiso, la composición química de los lixiviados que desembocan en el sistema de tratamiento de lixiviados.

b. El análisis deberá ser suficiente para determinar el impacto de los lixiviados en el sistema regular, la eficacia del sistema de tratamiento de lixiviados, la necesidad de modificación del sistema de monitoreo de aguas subterráneas o los límites de efluentes en un permiso NPDES, y las características reales de los lixiviados de la los residuos depositados en las instalaciones. A los efectos de este análisis, la muestra de lixiviados se tomará en el tanque de almacenamiento del afluente, el



lagunaje, y deberá ser representativo de la media de calidad diversa lixiviados afluente.

b. Los lodos resultantes del tratamiento de lixiviados pueden ser eliminados en la instalación si los lodos no son peligrosos.

288.457. Aviso Departamental y medidas correctivas.

El operador notificará inmediatamente al Departamento y describirá las medidas correctivas que deban adoptarse en caso de:

(1) El funcionamiento de las instalaciones de tratamiento de acuerdo con el plan aprobado no puede prevenir la violación de los términos de sus permisos, La Ley de Arroyos Limpios y su Regulación.

(2) La instalación está generando una calidad o cantidad de lixiviados que excede la capacidad de diseño del sistema de pre-tratamiento en el sitio.

(3) El acuerdo contractual para el tratamiento de lixiviados mediante un sistema de tratamiento fuera del sitio se viola o ha expirado.

(4) La calidad o cantidad de los residuos sólidos que se depositan en el sitio cambian con respecto a los descritos en el permiso.

- MÉXICO.

En México *el Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos*, Decreta la *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos*, Última Reforma DOF 19-06-2007, bajo la cual se rige:

Artículo 56. La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas para el almacenamiento de residuos peligrosos, las cuales tendrán como objetivo la prevención de la generación de lixiviados y su infiltración en los suelos, el arrastre por el agua de lluvia o por el viento de dichos residuos, incendios, explosiones y acumulación de vapores tóxicos, fugas o derrames.

Se prohíbe el almacenamiento de residuos peligrosos por un periodo mayor de seis meses a partir de su generación, lo cual deberá quedar asentado en la bitácora correspondiente. No se entenderá por interrumpido este plazo cuando el poseedor de los residuos cambie su lugar de almacenamiento.

Procederá la prórroga para el almacenamiento cuando se someta una solicitud al respecto a la Secretaría cumpliendo los requisitos que establezca el Reglamento.

Artículo 97. Las normas oficiales mexicanas establecerán los términos a que deberá sujetarse la ubicación de los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en rellenos sanitarios o en confinamientos controlados.

Las normas especificarán las condiciones que deben reunir las instalaciones y los tipos de residuos que puedan disponerse en ellas, para prevenir la formación de lixiviados y la migración de éstos fuera de las celdas de confinamiento. Asimismo, plantearán en qué casos se puede permitir la formación de biogás para su aprovechamiento.

Los municipios regularán los usos del suelo de conformidad con los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano, en los cuales se considerarán las áreas en las que se establecerán los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial (Diputados@, 2007).

- NICARAGUA.

En Nicaragua, la *Norma Técnica para el manejo y eliminación de residuos sólidos peligrosos. Norma Técnica No. 05 015-02, Aprobada el 13 de Septiembre del 2001*, dicta los siguientes requerimientos.

Diseño de sistemas de captación y de conducción de lixiviados.

11.1 Debe existir un sistema de captación de lixiviados por cada 1000 m<sup>2</sup> de celda o fracción de la misma.

11.2 Para el desplante del sistema de impermeabilización y del tubo captador del lixiviado previa preparación de la excavación, se conforma el terreno sobre el cual se tenderá una capa de arcilla de 30 cm a 100 cm de espesor compactada a 90% de la prueba próctor. El espesor de la capa de arcilla dependerá de las características plásticas del suelo.

11.3 Sobre la capa de arcilla compactada se coloca el sistema de impermeabilización sintético, el cual tendrá que ser protegido con otra capa de arcilla de 30 a 60 cm de espesor compactada al 90% de la prueba próctor.

11.4 Sobre la capa de arcilla se colocará un material granular arenoso, cuyos intersticios permite almacenamientos y flujo libre de lixiviados hacia al canal de recolección.

11.5 El sistema de captación y recolección del lixiviado se coloca sobre la estructura planteada en el punto 11.3 teniendo que ser cubierta con arcilla la parte inferior (no perforada) del tubo captador dejando la parte media superior (perforada) libre de arcilla con un ángulo de 45°, se coloca el material de contacto que cubrirá toda la base del canal, teniendo un espesor mínimo de 12 cm en el tubo captador y con una pendiente del 1.5% para su drenado Posteriormente se

cubrirá con grava de 3/4 de pulgada (19 mm) hasta la parte superior de la base del canal.

11.6 La resistencia de las paredes y del piso del sistema de captación y recolector de lixiviados deberá ser igual a la de las paredes de la celda.

11.7 El sistema de captación de lixiviados debe tener capacidad para que cada subcolector capture la décima parte del área servida por el sistema.

11.8 La velocidad de captación y escurrimiento del sistema debe ser mayor que la de velocidad de difusión en las paredes y pisos de la celda.

11.9 El sistema de captación de lixiviados debe contar con dos pozos de monitoreo independientes, uno para captar los lixiviados conducidos por los colectores sobre la membrana y otro para captar los lixiviados que penetren la primera barrera.

11.10 Cada pozo de monitoreo debe estar dotado de un sistema para la extracción de lixiviados.

11.11 La red de conducción de lixiviados estará compuesta de subcolector, colector, cárcamo y pozos de monitoreo de lixiviados como mínimo.

11.12 Todos los subcolectores deben conducir los lixiviados hacia el colector y éste a su vez descargará en el cárcamo de los pozos de monitoreo del lixiviado.

11.13 El colector y los subcolectores de los lixiviados deben tener un diámetro mínimo de 15 y 10 cm, respectivamente de acuerdo al volumen que se genere. Se debe diseñar una red de recolección de lixiviado, para determinar los diámetros requeridos.

11.14 La pendiente de escurrimiento del colector y subcolectores de lixiviados no debe ser menor del 2% en dirección al cárcamo.

11.15 La capacidad del cárcamo debe calcularse en función del caudal del diseño que depende de las dimensiones de la celda, de la precipitación pluvial promedio del sitio de confinamiento, así como la forma en que vayan a depositarse los residuos peligrosos en la celda (constante de compactación). En cualquier caso, el volumen útil del cárcamo no deberá ser inferior a un metro cúbico (Normas jurídicas de Nicaragua@, 2002).

## 5. TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS PARA EL MANEJO Y TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

La gestión de los lixiviados es un proceso vital para mitigar los efectos contaminantes que tiene un relleno sanitario sobre el medio ambiente. Para manejar los lixiviados que son recogidos o acumulados en el relleno se emplean diferentes métodos y tecnologías de diversas complejidades, tales como procesos físicos, químicos, biológicos, y en última instancia el descargue de los lixiviados a una planta de tratamiento de aguas residuales.

Los métodos y tratamientos para el manejo de lixiviados pueden dividirse en biológicos, físico-químicos, mecanismos avanzados con membranas y mecanismos de bajo coste.

### 5.1 PROCESOS BIOLÓGICOS

Los procesos biológicos son aquellos que involucran la interacción de las bacterias presentes en los lixiviados a través de procesos anaeróbicos y aeróbicos. Los procesos biológicos ya sea a través de algunas reacciones químicas u otros eventos resultan en una transformación.

Los sistemas de tratamiento biológicos para el tratamiento de lixiviados tienen como objetivo reducir la materia orgánica contenida en dicho líquido, reducir el contenido de nutrientes y eliminar los parásitos y patógenos (MARSILLI@, 2005)

Algunos de los procesos biológicos que se utilizan para tratar los lixiviados se muestran a continuación.

- Lodos activados.

Este proceso fue desarrollado por Arden y Lockett en Inglaterra en 1914. Un proceso de lodo activado es un tratamiento biológico aerobio, con el que se busca

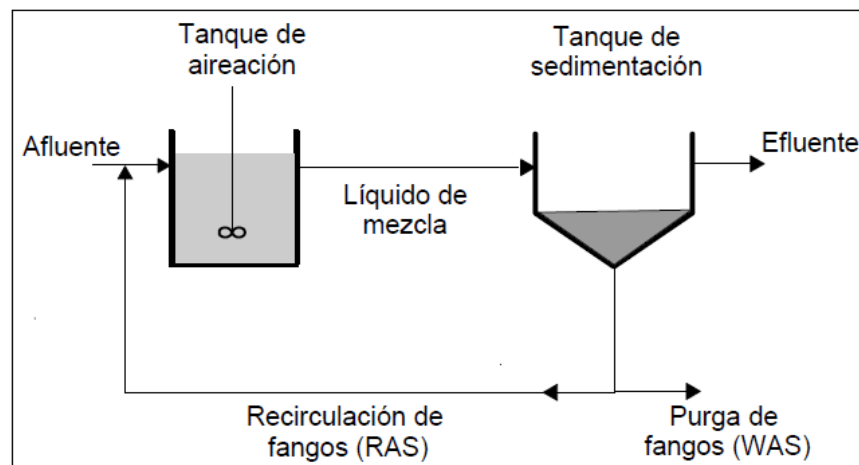
reducir la materia orgánica biodegradable presente en los lixiviados. En este proceso, se requiere un sistema de aireación y de agitación prolongada que favorece el crecimiento de organismos microbianos que tienen la capacidad de oxidar la materia orgánica. La aireación, o adición de oxígeno al medio, se hace a través de medios mecánicos tales como sopladores, aireadores superficiales. (BARBOSA@, 2009).

Una vez que la materia orgánica se ha oxidado lo suficiente, la mezcla se envía a un decantador en donde se separa el lodo del agua. Una parte del lodo biológico decantado, es recirculado al reactor, para que la concentración de microorganismos sea la adecuada.

Con este proceso, se logra satisfacer en alguna medida la demanda bioquímica del oxígeno, y se reduce un poco el nitrógeno amoniacal, gracias a las burbujas de aire que pasan a través de los lixiviados.

El proceso de fangos o lodos activos puede verse en la Figura 11.

Figura 11. Lodos activados.



(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

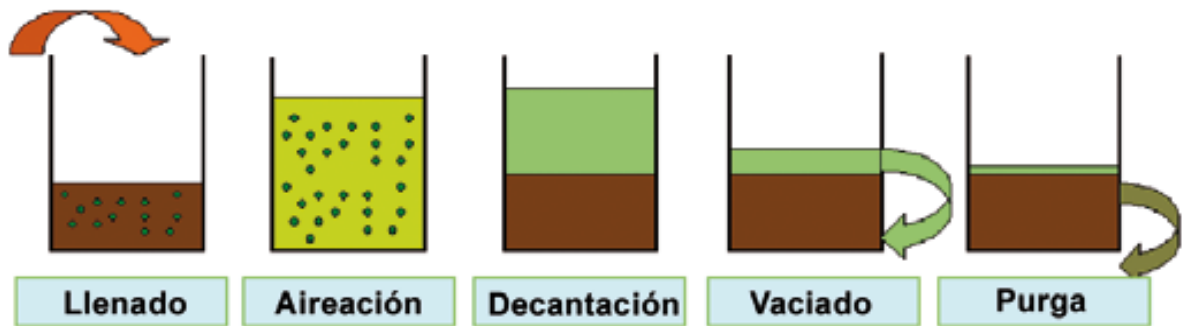
- Reactores biológicos secuenciales.

Los reactores biológicos secuenciales, SBR, son una variación del proceso de lodos activos, trabajando por cargas, debido a la necesidad de tratar grandes caudales de aguas residuales y lixiviados. En este proceso se mezclan los lixiviados y los lodos biológicos en un reactor. En la Figura 12 se muestran las etapas del proceso que se lleva a cabo en estos reactores secuenciales discontinuos.

Este proceso tiene muchas ventajas a la hora de utilizarlos para tratar lixiviados, ya que se considera de bajo costo, tanto en la inversión como en la operación, es un proceso muy flexible que resulta muy eficaz para tratar líquidos con concentraciones, caudales y composición variante, y además es fácil de operar.

La desventaja principal que presenta este método, es que al ser solamente un tanque reactor, el proceso debe hacerse por cargas, por lo que el flujo de líquidos a tratar debe ser relativamente bajo o los tanques de volumen muy grande.

Figura 12. Fases del proceso en SBR.



(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).



- Lagunas aireadas de estabilización.

Otro método biológico para tratar los lixiviados es la laguna o estanque de estabilización, en el cual el oxígeno es suministrado por medios mecánicos al igual que en el proceso de lodos activos. La acción de los aireadores y la de las burbujas de aire que ascienden desde el difusor mantiene en suspensión el contenido del estanque. Dependiendo del grado de mezclado, las lagunas suelen clasificarse en aerobias o aerobias-anaerobias (MONOGRAFÍAS@, 2000).

La principal desventaja de este método es la gran extensión de superficie que se requiere.

- Procesos de película fija o filtro anaerobio.

En un sistema de filtro anaerobio o película fija, una parte del material biológico se encuentra fijo, al estar adherido a un soporte sólido en el reactor biológico, y la otra parte se encuentra en suspensión. (GALLEGO, GEMINI, & KOROL, 2006).

El líquido se mueve normalmente de forma vertical, ya sea de forma ascendente o descendente. En este sistema el gas se recoge en la parte superior, y los sólidos en suspensión se sedimentan.

La rugosidad del material de soporte, su grado de porosidad, así como el tamaño del poro, afecta a la tasa de colonización de la población microbiana. Los materiales utilizados pueden ser ladrillos, granito, vinilos, poliésteres, poliuteranos, materiales cerámicos, de vidrio, etc. (WIKI LIBROS@, 2008).

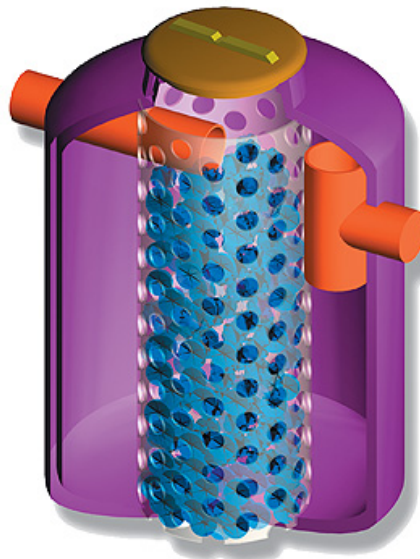
El uso del filtro anaerobio se aconseja para tratar aguas residuales que tienen una carga orgánica moderada, que sea soluble o que se degrade de forma fácil, o para tratar aguas residuales con elevada carga orgánica que sea soluble y que se pueda diluir al ser recirculado. El uso de los filtros con flujo descendente no se

aconsejan para tratar aguas que tengan fracciones apreciables de sólidos en suspensión, ya que éstos pueden provocar problemas de atascos (WIKI LIBROS®, 2008).

Dentro de estos tratamientos se pueden destacar los filtros percolados y los contactores biológicos rotatorios.

Los filtros percoladores, Figura 13, se encargan de remover la materia orgánica presente en los lixiviados. Para lo cual se hace pasar el lixiviado a través de un filtro, que tiene adherida una película de organismos microbiológicos.

Figura 13. Filtro percolador.



(MATERIALES Y DISEÑOS®, 2009).

Los contactores biológicos rotatorios, conocidos comúnmente como biodiscos, son discos de gran tamaño que se encuentran parcialmente sumergidos en el agua residual, y que giran a bajas revoluciones, haciendo que el líquido tenga contacto con el aire y la superficie del disco. Por lo que se produce una película de células

en la superficie de los discos, que ayudan a degradar la materia orgánica (véase Figura 14).

Figura 14. Contactor biológico rotatorio.



(DEPURADORAS@, 2009).

- Lagunas anaerobias.

Las lagunas anaerobias son sistemas de retención de lixiviados en las cuales no hay presencia de oxígeno. Por lo general estas lagunas tienen una profundidad de dos a cinco metros y se utilizan para tratar lixiviados con altas cargas orgánicas.

Estas lagunas se emplean para minimizar el contenido sólido y materia orgánica en los lixiviados.

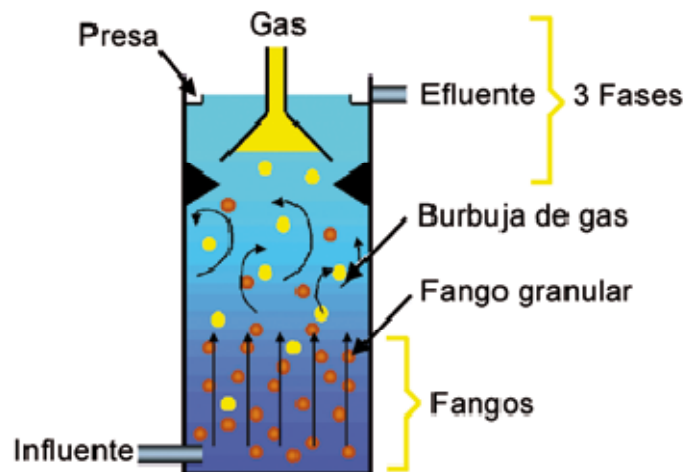
La gran desventaja que tiene este proceso es el olor que generan, que puede ser incluso más contaminante que el mismo lixiviado. Además el proceso es más lento que el aerobio.

- Reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos (UASB).

Es un proceso continuo que consta de un tanque que se encuentra lleno de lodo, que sirve como filtro. En este sistema los lixiviados son distribuidos por la parte inferior del reactor UASB, y viajan de forma ascendente a través del manto de lodos, donde se da la degradación anaerobia de los microorganismos. La actividad microbiológica produce burbujas de gas (metano y  $\text{CO}_2$ ), que ascienden a través del reactor y se recogen en una chimenea. El líquido clarificado sale por la superficie del tanque (BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

Algunas de las ventajas de este proceso son el bajo costo, el espacio reducido que se requiere para su instalación, y la producción de biogases que puede emplearse, tras un proceso de limpieza profunda, como fuente de energía.

Figura 15. Reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos.



(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

- Nitrificación/desnitrificación.

La eliminación biológica del nitrógeno se logra gracias a dos procesos continuos, la nitrificación y la desnitrificación. Primero, en la etapa de nitrificación, el amonio se oxida a nitratos por medio de las bacterias nitrificantes. Luego, en la etapa de desnitrificación, los nitratos se transforman en nitrógeno gas a través de las bacterias desnitrificantes (ANOXKALDNES@).

## 5.2 PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS

Algunos de los procesos aplicados al tratamiento de lixiviados son los físico-químicos. Estos procesos se utilizan generalmente para tratar los lixiviados viejos, ya que en éstos, el índice de biodegradabilidad ( $DBO_5/DQO$ ), como se muestra en la Figura 3, es más bajo, y los procesos biológicos, tanto anaerobios como anaeróbicos, son poco eficientes.

Existen en la bibliografía una gran variedad de tratamientos físico-químicos de lixiviados, los cuales por lo general se utilizan como pre-tratamiento para eliminar los sólidos disueltos presentes en los lixiviados que puedan interferir con las etapas de tratamiento posteriores, a través de cambios en las propiedades físico-químicas de la mezcla, utilizando medios físicos.

- Neutralización.

La neutralización es un tratamiento ácido-base que se puede utilizar con los siguientes fines:

- Ajuste final del pH entre 5 y 5,9, del efluente último antes de la descarga al medio receptor.
- Ajustar el pH antes de realizar un tratamiento biológico. Para que haya una actividad biológica óptima el pH debe estar entre 6,5 y 8,5.

- Precipitación de metales pesados. Los metales pesados se precipitan normalmente en forma de hidróxidos, utilizando cal hasta alcanzar el pH óptimo de precipitación, entre 6 y 11 (ANALIZA CALIDAD@).

- Evaporación.

Este proceso suele emplearse cuando no es posible hacer descarga de lixiviados. La evaporación puede ser aplicada casi a cualquier tipo de lixiviado, siempre y cuando el líquido sea lo suficientemente volátil y los otros componentes sean no volátiles y estables.

El proceso de evaporación consiste en deshidratar el lixiviado, evaporando el agua presente en éste y dejando los residuos sólidos; para lo cual se pone en contacto el líquido con aire no saturado.

Tanto el lodo como el vapor resultante que es condensado, contienen componentes nocivos, por lo que requerirán un tratamiento posterior para eliminarlos. El proceso de evaporación, logra disminuir la cantidad de lixiviado, por lo que se hace más fácil su tratamiento posterior.

Este proceso puede resultar muy costoso desde el punto de vista energético. Sin embargo, la evaporación puede llevarse a cabo utilizando la energía que se tiene del biogás que se produce en el mismo relleno, para evaporar el lixiviado por calentamiento.

Esta evaporación puede hacerse de dos maneras. La primera es utilizar de forma directa la energía que se produce al quemar el biogás; y la segunda es utilizar el calor residual que generan motores de combustión o turbinas, que emplean biogás para su funcionamiento, generando energía.

- Precipitación química.

La precipitación química consiste en agregar agentes coagulantes y floculantes tales como cal, alúmina, cloruros, etc., que permitan eliminar principalmente metales pesados y sólidos en suspensión.

- Intercambio iónico.

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que se da cuando un ion de una disolución se intercambia por otro ion de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil (TECNOCENCIA@, 2001).

El intercambio iónico requiere que el agua residual haya recibido un pre-tratamiento para eliminar algunos sólidos suspendidos y materia orgánica.

El proceso de intercambio iónico permite mediante el paso del agua a través de una resina sólida, sustituir por iones de sodio, los iones de calcio y magnesio, formando sales solubles.

Las resinas de intercambio iónico deben ser regeneradas con soluciones cada vez que se saturan, pues pierden su efectividad con el uso.

- Oxidación.

Los procesos de oxidación sirven para eliminar o transformar materia orgánica y materia inorgánica oxidable, y para destruir microorganismos patógenos. Estos procesos son altamente efectivos y rápidos porque transforman los compuestos orgánicos en óxidos de carbono y agua generalmente.

Un tipo de oxidación química empleada para tratar aguas residuales y lixiviados, es la oxidación por aire húmedo, que es una tecnología innovadora que ayuda a destruir material orgánico y materiales peligrosos presentes en los lixiviados. En

este proceso se emplea presión y temperaturas entre 120°C y 320°C, que favorecen la reacción de oxidación y evitan que el agua se evapore excesivamente (BAIRD, 2001).

El proceso de oxidación por aire húmedo consiste en oxidar los componentes que están disueltos o suspendidos en el agua, utilizando el oxígeno como oxidante.

Otro tipo de oxidación química, es la oxidación catalítica por reactivo fenton, que oxida la materia contaminante utilizando peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso, normalmente a presión atmosférica y temperaturas entre 20 y 40°C. Los mejores resultados de este proceso se obtienen con un pH ácido, donde se pueden alcanzar altas remociones de los contaminantes orgánicos (BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

- Fraccionamiento amoniacal o *stripping*.

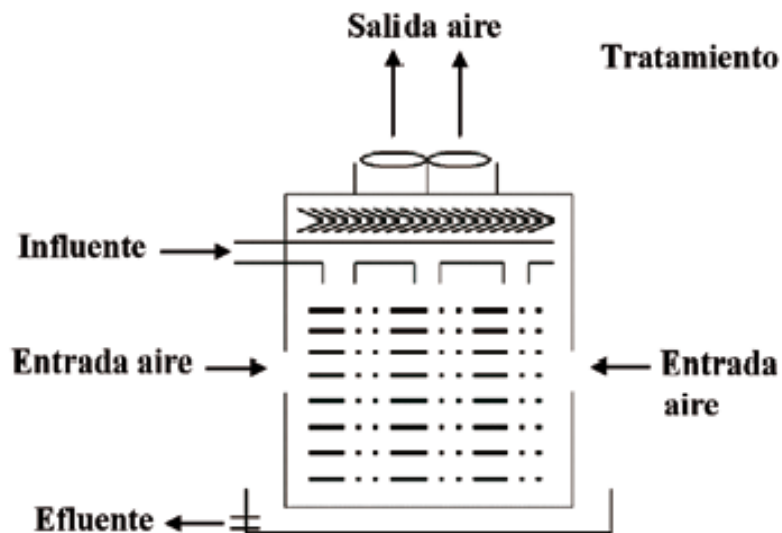
Es uno de los procesos más utilizados para eliminar el nitrógeno amoniacal presente en las aguas residuales. Se basa en un proceso de aireación por el cual se eliminan los gases disueltos en un agua residual o un lixiviado.

Este proceso puede emplearse cuando los compuestos a eliminar del agua tienden a convertirse en gas. Mediante este proceso se transvasa la contaminación de un líquido a un gas.

El método de *stripping* se lleva a cabo en una columna que tiene un relleno por el cual desciende el agua, mientras el gas circula en el sentido contrario, arrastrando el amoniaco.



Figura 16. Fraccionamiento amoniacal.



(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

- Sedimentación-flotación.

Su objetivo es separar la materia en suspensión presente en las aguas residuales o lixiviados. Para lograrlo, primero se hace un proceso de sedimentación, donde las partículas de mayor peso que el líquido y mayor tamaño de diámetro, van al fondo del tanque donde son retirados y eliminados. Este proceso puede reducir de un 20 a un 40% la  $DBO_5$  y de un 40 a un 60% los sólidos en suspensión. Por lo que es necesario continuar con un proceso de flotación, donde se fuerza la entrada de aire, por lo que se satura de aire, generando burbujas y haciendo que las partículas en suspensión floten, de donde pueden ser retirados, eliminando el 75% de los sólidos en suspensión. Su aplicación es limitada, pero puede combinarse con otros métodos como la coagulación-floculación.

- Coagulación-floculación.

Se utiliza para eliminar sólidos en suspensión y material coloidal. Consiste en un proceso de coagulación, donde se desestabilizan las partículas coloidales mediante productos químicos (coagulantes), neutralizando la carga eléctrica de los coloides; y un proceso de floculación que mediante la utilización de químicos (floculante) agrupa las partículas coloidales que fueron previamente desestabilizadas, formando aglomerados que se sedimentan por gravedad (ANALIZA CALIDAD@).

Como coagulantes suelen usarse químicos como sales de aluminio, y sales de hierro.

- Filtración.

Consiste básicamente en hacer pasar el líquido que contiene sólidos en suspensión a través de un medio filtrante, dejando pasar el líquido y reteniendo los sólidos. Debe emplearse en conjunto con otros tratamientos.

- Adsorción de carbón activo.

La adsorción es un proceso en el cual se eliminan las partículas solubles de un líquido, al adherirse a un sólido. En este caso, el sólido es el carbón activo granular (GAC). La adsorción se da mediante la formación de enlaces físicos o químicos entre el lixiviado y la superficie de los poros del carbón activo granular.

Este proceso, consta de una columna rellena de carbón activo, por la cual es bombeado el líquido, un filtro en donde se quedan las partículas sólidas contenidas en los lixiviados y un sistema de drenaje a través del cual los líquidos son expulsados.

La actividad del carbón activo de la columna depende de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias (LENNTECH@).

Figura 17. Adsorción por carbón activo.



(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007)..

- Electrocoagulación.

Es un proceso electroquímico que separa al mismo tiempo metales pesados, sólidos en suspensión, compuestos orgánicos y muchos otros contaminantes presentes en el agua con ayuda de la electricidad en lugar de reactivos químicos, como en el proceso de coagulación presentado anteriormente. Los lodos que se producen durante el tratamiento pueden ser separados por filtración, decantación o flotación (Hidritec@, 2009).

El proceso de electrocoagulación consiste en pasar el agua residual de forma continua a través de electrodos conectados a una fuente de corriente continua, formándose coágulos que flotarán o sedimentarán. El agua residual debe poseer una cantidad suficiente de sales neutras para que puedan tener lugar las múltiples reacciones electroquímicas.

A pesar de que este es un método que comúnmente se utiliza para tratar aguas residuales, se han realizado estudios que han demostrado que éste también es aplicable a la problemática de los lixiviados, cuando se busca disminuir su carga orgánica. Las mejores depuraciones durante un estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia, en Manizales, se lograron al utilizar electrodos de aluminio, en 15 minutos de operación para un voltaje de 3,0 voltios (Mercado Martínez, Reyes Ávila, & Agrono Hurtado).

### 5.3 PROCESOS AVANZADOS CON MEMBRANAS

Los procesos de membrana consisten en hacer pasar el líquido a través de una membrana porosa ejerciendo una fuerza impulsora, con lo cual se consigue una separación del líquido de las partículas sólidas.

Las membranas son capas de hojas muy delgadas microporosas que están sujetas a una estructura de soporte más gruesa y porosa. El material de las membranas puede variar desde acetato de celulosa o cerámicos hasta otros polímeros como polisulfonatos, polivinildieno.

La filtración por membrana funciona como filtros asimétricos, donde las capas superiores son las que tienen contacto directo con el fluido a tratar, y la estructura de soporte tiene poros que generalmente se hacen más grandes al irse alejando de la superficie (TECNOLOGÍA S.A. DE C.V@, 2001).

El tratamiento de lixiviados por membranas requiere de una inversión inicial más fuerte que los procesos físicos y/o químicos. Sin embargo debe ser analizado su uso, puesto que el costo de operación, la disposición final y almacenamiento de residuos pueden hacer de ésta una inversión muy interesante.

Existen varios tipos de procesos con membranas que dependen de su composición y del tamaño de poro de su capa delgada.

- Microfiltración (MF).

Rechaza partículas 10 veces por debajo de un micrómetro. Trabaja con base en membranas semi-permeables de baja presión, que se utilizan para separar sólidos suspendidos del agua, pero dejan pasar sales y macromoléculas.

- Ultrafiltración (UF).

Rechaza macromoléculas como lo son las proteínas. Trabajan con base en una membrana semi-permeable de baja presión que se emplea para separar partículas de alto peso molecular del agua, dejando pasar sales y partículas de bajo peso molecular. Son capaces de remover por encima del 90% de los contaminantes. Este proceso requiere pre-tratamientos que eliminen aceites, grasas y material suspendido.

- Nanofiltración (NF).

Rechaza sales divalentes, azúcares y ácidos disociados. Las membranas de nanofiltración pueden ser membranas tubulares o espirales, hechas especialmente para la recuperación de cáusticos y ácidos.

- Ósmosis inversa (RO).

Rechaza sales monovalentes y ácidos no disociados. Trabaja con base en una membrana semi-permeable de alta presión, que se emplea para separar partículas de bajo peso molecular y sales disueltas en el agua, removiendo hasta el 95,5% de las impurezas. Este proceso requiere pre-tratamientos físicos y químicos, que pueden llegar a ser muy complejos.

Para emplear procesos de filtración con membranas es necesario que el agua residual sea compatible químicamente con el material de la membrana o que los compuestos que sean incompatibles, sean retirados previamente.

## 5.4 MECANISMOS DE BAJO COSTE

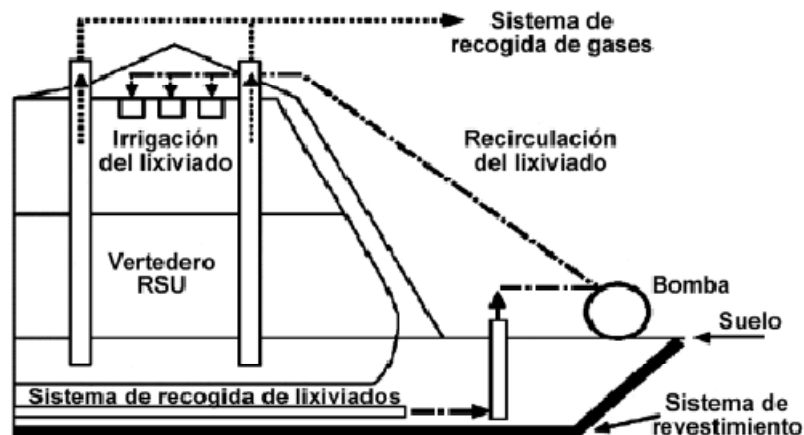
- Recirculación de lixiviados.

La recirculación de los lixiviados se ha propuesto como un método de tratamiento alternativo, en el cual se considera el relleno de residuos sólidos como un filtro anaerobio, de tal manera que se logre aquí mismo la conversión de los ácidos grasos presentes en los lixiviados a metano (GIRALDO, 2001).

En este proceso, aumenta la humedad del relleno, lo que hace que aumente la producción de metano. Además, el pH del lixiviado aumenta con lo que disminuyen los metales en suspensión presentes en este líquido.

El tratamiento de recirculación, debe ser complementado con otros tipos de tratamiento, para cumplir con los permisos de vertimiento de lixiviados. Además deben ser considerados los riesgos sanitarios que este tratamiento podría generar.

Figura 18. Recirculación de lixiviados por aspersion.



(BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I), 2007).

- Co-tratamiento de aguas residuales.

Cuando los lixiviados no pueden ser tratados en el mismo lugar donde se generan, éstos pueden ser transportados a plantas de tratamiento de aguas residuales, o depositados en los alcantarillados, después de haber recibido un pre-tratamiento de acondicionamiento.

Sin embargo, este tratamiento sólo puede ser utilizado para tratar lixiviados que no contengan sólidos peligrosos, en preferencia, aquellos procedentes de residuos sólidos urbanos.

Entre las posibles ventajas que ofrece este tratamiento es la mayor aportación de nutrientes a la depuradora, conveniente, ya que las aguas residuales urbanas contienen exceso de fósforo, que es equilibrado con los lixiviados de vertedero que se caracterizan por una carga importante de nitrógeno (BÓRDALO, HIDALGO, GÓMEZ, MURCIA, & MARÍN, Tecnologías de tratamiento de vertedero (II), 2007).

## 6. APLICABILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

Como se revisa en el capítulo 5 de este proyecto, existen diversos métodos y tecnologías que se emplean para tratar los lixiviados y las aguas residuales. Sin embargo, para cada caso particular, la aplicación de algunos procesos puede resultar más beneficiosa, de acuerdo a las propiedades físico químicas del líquido a tratar.

Los métodos que se emplean para el tratamiento de los lixiviados provenientes de rellenos sanitarios, varían según la edad del mismo lixiviado, puesto que como se muestra en la Tabla 1 en el capítulo 1, las propiedades y características de los lixiviados tienden a mantenerse dentro de ciertos rangos de acuerdo a su madurez.

En los países subdesarrollados, los componentes de los desechos sólidos, y la baja industrialización, hacen que los lixiviados tiendan a contener mayor cantidad de residuos orgánicos, por lo que la biodegradabilidad de éstos es mayor.

Es bueno aclarar que no existe un proceso único con el cual pueda removerse toda la carga contaminante presente en los lixiviados, por lo que deben emplearse varios tratamientos de forma conjunta.

Giraldo E. desarrolló la siguiente tabla, que sirve como orientación para elegir el tipo de tratamiento a utilizar dependiendo del componente específico que se busca eliminar.



Tabla 6. Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados.

Componente a eliminar en el lixiviado	Rendimiento del tratamiento						
	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas Naturales	UASB
DBO	Muy alto	Alto	Muy Alto	Intermedio	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Nutrientes	Alto	Muy Bajo	Muy Alto	Bajos	No	No	Variable
Metales	Intermedio	Alto	Muy Alto	Intermedios	Alto	Alto	Alto
COV	Alto	+	Muy Alto	+	No	+	Variable
Patógenos	Bajo	Bajo	Muy Alto	Bajo	Muy Alto	Variable	Variable

(GIRALDO, 2001).

A continuación, se presenta un listado de los tratamientos que mayor aplicabilidad tienen para el tratamiento de los diferentes tipos de lixiviados, ya que atacan de mejor manera las características presentes en éstos.

## 6.1 LIXIVIADOS JÓVENES

Los lixiviados jóvenes son aquellos que provienen de rellenos sanitarios o vertederos con menos de dos años de operación.

Los lixiviados jóvenes se caracterizan principalmente por tener una alta carga orgánica, especialmente aquella que es susceptible de ser oxidada por medios biológicos ( $\text{DBO}_5$ ), lo que los hace a su vez altamente biodegradables. Estos lixiviados tienden a ser ácidos, con altos contenidos de sólidos suspendidos totales, de nitrógeno amoniacal y carbono orgánico.

Los metales pesados a su vez, tienden a encontrarse en mayor cantidad en los lixiviados jóvenes que en los maduros.

De acuerdo a las propiedades físicas y químicas presentes en este tipo de lixiviados, la utilización de algunos tratamientos pueden resultar más eficientes que otros, especialmente los procesos biológicos.

Dentro de los procesos recomendables para emplear como tratamiento para los lixiviados jóvenes se encuentran los siguientes:

- Lodos activados: este método ayuda a disminuir el contenido de nitrógeno y a satisfacer la demanda biológica de oxígeno.
- Lagunas aireadas de estabilización: aunque requieren de más espacio, pueden resultar tan efectivas como los lodos activados para satisfacer la

demanda bioquímica de oxígeno y para disminuir el contenido de nitrógeno presente en los lixiviados.

- **Lagunas anaerobias:** este tipo de tratamiento biológico, ayuda a disminuir el contenido de sólidos suspendidos y la materia orgánica presente en los lixiviados.
- **Neutralización:** este método ayuda a ajustar el pH entre 6.5 y 8.5, antes de proceder a utilizar los tratamientos biológicos, para que la actividad biológica sea óptima.

## 6.2 LIXIVIADOS MADUROS

Los lixiviados maduros son aquellos provenientes de rellenos sanitarios con más de diez años de funcionamiento. Este tipo de lixiviados, tiene menor carga orgánica que los lixiviados jóvenes, por lo que su biodegradabilidad también es menor, como se observa en la Figura 8, en el capítulo 3.

Los lixiviados maduros tienden a ser neutros, con bajos contenidos de carbono orgánico, nitrógeno, sólidos suspendidos, y en general menores contenidos de metales pesados que en los lixiviados jóvenes.

Teniendo en cuenta la composición de los lixiviados maduros que se mencionaron anteriormente, los métodos que más beneficiosos pueden resultar a la hora de tratarlos son los tratamientos físico-químicos, ya que los biológicos pueden llegar a ser ineficientes.

A continuación se presentan los métodos que se recomiendan para el tratamiento de los lixiviados maduros según su composición.

- Coagulación-floculación: este proceso, busca la eliminación de sólidos suspendidos y del material coloidal, a través del uso de coagulantes como sales de aluminio y sales de hierro, que desestabilizan los sólidos, y luego el uso de floculantes que agrupan y aglomeran los sólidos desestabilizados, haciendo que se sedimenten por gravedad.

Este método puede resultar efectivo para la eliminación de la demanda química de oxígeno.

- Oxidación química: este método ayuda a eliminar la materia orgánica e inorgánica oxidable que está presente en los lixiviados, de forma rápida y efectiva.
- Adsorción de carbón activo: mediante este proceso se logra la eliminación de las partículas solubles presentes en los lixiviados.
- Filtración con membranas: estos métodos más avanzados, logran separar los sólidos presentes en los lixiviados. La ósmosis inversa en especial, resulta tener una eliminación de la demanda química de oxígeno, el nitrógeno amoniacal, los compuestos orgánicos halogenados y los cloruros, entre el 90 y el 99%.

### 6.3 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son producto de la actividad humana, y se dan tanto a nivel doméstico, urbano o industrial. Estas aguas, al igual que los lixiviados presentan características físicas, químicas o biológicas que pueden ser perjudiciales para la salud tanto de las personas como de los animales, y que a su vez pueden afectar al medio ambiente.

Algunas definiciones de aguas residuales, pueden llegar a coincidir con las definiciones de lixiviados, puesto que éstas son aquellas que arrastran consigo los desperdicios que se generan en los procesos agrícolas, industriales, domésticos y comerciales. Estas aguas tienen un contenido de sólidos tanto orgánico como inorgánico porcentualmente menor al de los lixiviados.

De acuerdo al tipo de industria, las aguas residuales tendrán ciertas características, que definirán el método de tratamiento a emplear. A continuación se presenta un listado de las tecnologías que pueden emplearse para tratar las aguas residuales provenientes de diferentes tipos de industrias y lavados de aguas domésticas.

#### 6.3.1 Industrias Químicas

Las industrias químicas son las que se ocupan de los procesamientos y de la extracción de las materias primas, tanto naturales como sintéticas, y a su vez se encarga de transformarlas en otras sustancias que tienen diferentes características diferentes de las que tenían en un principio, esto se hace con el fin de satisfacer las necesidades de la comunidad y otros tipos de industrias. Su objetivo principal es elaborar productos innovadores, con calidad y causando el menor daño posible al medio ambiente (Wikipedia@, Industrias Químicas).

Para cumplir con este último objetivo, que es más un requisito establecido por la ley que un objetivo como tal de estas industrias, las empresas que trabajan con procesos químicos tienen que garantizar un control de la contaminación, disminuyendo los impactos nocivos por medio de programas del agua, aire y suelo acordes con la legislación y otros requisitos aplicables.

Por esta razón, y debido a que la normatividad es cada día más exigente con relación al tema ambiental, todas las industrias químicas actuales, deben tratar sus aguas residuales. Sin embargo, no todas las industrias químicas existentes en

Colombia y el mundo cuentan con planta de tratamiento de aguas residuales, o no cuentan con la planta adecuada para este tipo de industria.

Las tecnologías adecuadas para tratar las aguas residuales de casi todas las industrias químicas, son las físico-químicas ya que estas sirven para eliminar los sólidos disueltos a través de cambios en las propiedades físico-químicas de la mezcla. Dentro de estos procesos se destacan Los siguientes para el tratamiento de aguas residuales.

- Floculación
- Sedimentación y flotación
- Oxido reducción
- Coagulación
- Neutralización
- Filtración
- Precipitación química.
- Intercambio iónico.

Luego de un proceso físico-químico normalmente se tienen que hacer procesos biológicos para garantizar los parámetros requeridos para la descarga de agua.

#### 6.3.2 Industrias de Alimentos

La industria de alimentos, se encarga de la elaboración, transformación, preparación, conservación y envasado de los alimentos de consumo humano y animal. Las materias primas de esta industria se centran en los productos de origen vegetal (agricultura) y animal (ganadería), principalmente.

Esta industria ha crecido de manera exponencial, creando nuevos y novedosos productos alimenticios.

A causa de los procesos empleados para la elaboración, transformación, preparación, conservación y envasado de estos productos alimenticios, se generan residuos y contaminantes. Entre estos residuos, se incluyen las aguas utilizadas para los procesos, las cuales deben ser tratadas de manera adecuada (Wikipedia@, Industria alimentaria).

Principalmente los procesos biológicos son los más adecuados para el tratamiento de aguas residuales procedentes de las industrias de alimentos ya que estos tienen grandes contenidos de materia orgánica. Dentro de los procesos biológicos se destacan más para el tratamiento de esta agua los:

- Lodos activados.
- Procesos de película fija o filtro anaerobio.
- Reactores anaerobios de flujo ascendente.

Por otro lado, hay un caso en especial de la industria de alimentos específicamente en la parte de embotellado de productos de líquidos de consumo diario.

Debido a que el agua es cada día más escasa y costosa y las actividades en una industria de bebidas requieren considerable cantidad de este recurso, entre 2,1 litros y 2,4 litros por un litro de producto a embotellar; se opta no sólo por tratar las aguas residuales para cumplir con la normatividad exigida por la ley, sino que se trata de aprovechar al máximo otro tipo de aguas residuales para la ejecución de los diferentes procesos.

Para estas plantas se pueden manejar diferentes tipos de aguas industriales según su uso y de acuerdo a la materia prima que se vaya a tratar. Se podría tener agua cruda de pozo y someterla a procesos fisicoquímicos para convertirla en aguas de servicios generales, para refrigeración de equipos y maquinaria. También se cuenta con agua suavizada que se utiliza para lavado de botellas

retornables y refrigeración de equipos auxiliares para la generación de aire y de refrigeración. Otro tipo de agua es el que se utiliza para servicios generales, baños y jardines. Se recupera agua de los procesos de lavado de botellas, de limpieza la cual se trata y se reutiliza en pre-lavado de botellas y para lavar pisos de bodegas (Wikipedia@, Industria alimentaria).

### 6.3.3 Industrias de lavandería y tintorería

Al igual que para las anteriores industrias, las industrias de lavandería y tintorería requieren tratar las aguas que usan. Esta industria en especial, requiere de grandes cantidades de agua para el funcionamiento de sus procesos.

A continuación, se muestran algunos de los procesos recomendados para el tratamiento de esta agua.

- Electrocoagulación: uno de los mejores tratamientos para este tipo de casos es el uso de la electrocoagulación, que es un tipo de coagulación donde no se utilizan coagulantes químicos, sino corriente eléctrica a través de placas metálicas paralelas.

Algunas de las ventajas que presenta este método de tratamiento es que es altamente eficiente para la remoción de una gran variedad de contaminantes, el agua se purifica y puede reutilizarse, el paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas más pequeñas de contaminantes, creando flóculos más grandes que los generados con la coagulación química (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006).

- Recirculación de agua: las aguas producidas por enjuague y secado pueden ser recirculadas, lo que significa un ahorro significativo para la lavandería, ya que no debe incurrirse en los gastos de comprar agua limpia,



jabón, combustible para calentar el agua y la instalación de un drenaje especial.

Las máquinas lavadoras se pueden conectar para usar agua reciclada durante el proceso de lavado y enjuague primario, y usar agua limpia municipal para el enjuague final. La calidad del agua se asegura monitoreando la turbiedad y administrando un desinfectante por medio de un dispositivo electrónico automático.

- Filtración, oxidación química y floculación: por otro lado, para los efluentes textiles específicamente, se recomiendan tratamientos mediante filtración, oxidación química y técnicas especializadas de floculación, así como pre-tratamientos que incluyen digestión anaeróbica, biorreactores de película fija, reactivos de oxidación Fenton, electrólisis o flotación por espuma (García & Solís Fuentes, 2008).

#### 6.3.4 Lavado doméstico

El lavado doméstico, es una función indispensable en todas y cada una de las sociedades. A partir de éste se generan aguas residuales particularmente homogéneas en sus contenidos, aunque eso depende mucho de las diferentes culturas y prácticas de lavados. Los contenidos son principalmente:

- Materia Orgánica (principalmente) en suspensión y disuelta.
- N; P; NaCl y otras sales minerales.
- Microcontaminantes procedentes de nuevos productos.

La responsabilidad por el tratamiento de las aguas residuales domésticas, por ser una actividad complementaria del servicio público de alcantarillado, es de las administraciones municipales, de forma que éstas deben velar por la disminución del impacto sobre el medio ambiente, encargándose, directamente o a través de las entidades prestadoras de los servicios públicos, de la construcción, operación

y mantenimiento de los sistemas de tratamiento y disposición adecuada de las aguas residuales domésticas (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Debido al proceso de urbanización que han tenido las áreas urbanas, el incremento de las coberturas de acueducto y alcantarillado en estas áreas y el bajo cubrimiento en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, ha aumentado significativamente el deterioro de los cuerpos de agua.

A pesar que toda la responsabilidad del tratado de las aguas residuales domésticas sea de la administración municipal, todas las personas pueden aportar al cuidado y facilitar el tratamiento de estas aguas. Obviamente no es viable tener una planta de tratamientos de agua por cada casa o edificio residencial, pero si se pueden realizar procedimientos que ayuden al cuidado de las aguas residuales domésticas. A continuación se presentan algunos de ellos.

- Usar la ropa la mayor cantidad de veces que sea posible antes de lavarla.
- Usar la menor cantidad de detergente posible. Los detergentes son derivados químicos del petróleo, que contaminan lagos y mares. Estudios estiman que una familia de 4 personas usan 50 litros/kilos de detergente al año.
- Separar la ropa que está más sucia de la menos sucia, puesto que la más sucia requiere mayor tiempo de lavado o más detergente.
- Llenar la lavadora hasta donde sea posible. No usar la lavadora con poca carga de ropa.
- Actualmente, existe en el mercado unas bolas de lavado, que son las bolas de lavado Wellos. Estas bolas son hechas en Corea de sur y En comparación con los procesos de lavado normales, los resultados obtenidos por esta bola han demostrado su valía y solidez, ahorro monetario y la reducción del consumo de detergentes, de agua, de electricidad y de tiempo. Es el sustituto ideal para las funciones básicas de

los detergentes en polvo y líquidos para lavar. Ésta, está compuesta de cuatro productos cerámicos básicos incluidos en su interior y ha sido diseñada por científicos para limpiar sin necesidad de utilizar detergentes (Wellos@, 2010).

## 7. USOS Y APLICABILIDADES DE LOS RESIDUOS DE LOS LIXIVIADOS

Los lixiviados como se menciona anteriormente, son líquidos con altas concentraciones de contaminantes orgánicos, lo cual trae una cantidad de problemas e impactos ambientales si estos líquidos no son tratados correctamente. Sin embargo, son precisamente estas concentraciones, por las que estos líquidos pueden ser útiles para aplicaciones tales como las que se muestran a continuación.

### 7.1 COMPOSTAJE

El compostaje es el proceso biológico aeróbico, mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable (restos de cosecha, excrementos de animales y residuos urbanos), permitiendo obtener compost, abono excelente para la agricultura (INFOAGRO@).

El compost es entonces el producto que se obtiene cuando la materia orgánica se degrada de forma aerobia, hasta transformarse en una mezcla estable, y homogénea.

El proceso de producción de compostaje consiste en hacer pilas con el material a descomponer, el cual debe mantener una temperatura y humedad para que los microorganismos se puedan descomponer de forma adecuada. Para mantener la humedad, las pilas pueden ser regadas con los líquidos que se generan de dicha descomposición, los lixiviados.

Después de aproximadamente 14 semanas, se filtra el compost producido para obtener un material homogéneo y fino, que se deja madurar durante dos o tres meses.

Las impurezas se eliminan haciendo pasar el compost a través de diferentes tamices (EMISIÓN@).

Los lixiviados pueden aportar al compost una gran población microbiana, ya que estos contienen altas concentraciones de bacterias y microorganismos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el proceso de compostaje no deben tener olores desagradables, por lo que se debe tener especial cuidado a la hora de utilizar los lixiviado en el proceso.

## 7.2 BACTERIAS GENERADORAS DE ENERGÍA.

Cuando se habla de bacterias, se piensa en microorganismos dañinos, causantes de enfermedades y epidemias, y aunque hay algo de cierto en esto, las bacterias pueden ser utilizadas para algunos fines específicos que no precisamente son virulentos. Uno de los fines en el cual se utiliza actualmente es para la generación de energía.

Las bacterias son microorganismos que pueden subsistir en la tierra, el agua y en los organismos. En el caso de los líquidos lixiviados, éstas encuentran un gran hábitat para subsistir y reproducirse. El pH en el cual subsisten mejor las bacterias es de 6 - 7.5, por lo que en los lixiviados maduros es más probable que hayan grandes concentraciones de bacterias.

En un artículo publicado en El Universal, México, en el 2008, se dice que a partir de bacterias, científicos estadounidenses están produciendo electricidad con la suficiente energía para alimentar pequeños aparatos como calculadoras, computadoras o instrumentos de medición. También se ha descubierto que ciertas bacterias que habitan en sedimentos acuáticos, son capaces además de limpiar eficientemente suelos contaminados con metales pesados como cadmio, vanadio, uranio o cromo (CERÓN, 2008).

En otro artículo de una revista española, publicado en el 2009, se dice que investigadores estadounidenses descubrieron la forma de obtener electricidad de las bacterias, específicamente de las geobacterias, que son microbios que producen corriente eléctrica a partir de barro o aguas residuales. Esta bacteria tiene la capacidad de generar ocho veces más electricidad que el organismo original (CAGLIANI, 2009).

Con este descubrimiento, no sólo se podrán extraer electricidad del lodo, sino que además, dicen los investigadores, se podrán diseñar células de combustible a base de microbios que conviertan aguas residuales o biomasa en electricidad, las cuales podrían poner en funcionamiento dispositivos móviles, e incluso podrían servir para alimentar vehículos o dispositivos de implantes médicos.

Estas células de combustible microbianas consisten en un ánodo, que acepta electrones de los microorganismos, y un cátodo, que transfiere electrones al oxígeno. Los electrones fluyen entre el ánodo y el cátodo para proveer corriente eléctrica que puede ser cosechada para alimentar a cualquier dispositivo electrónico (CAGLIANI, 2009).

Lo más curioso de todo esto, es que con los mismos lixiviados se estaría ayudando a conservar el medio ambiente, ya que a diferencia de los medios de producción de energía convencionales, las bacterias no generan bióxido de carbono, gran contribuyente del calentamiento global y de la contaminación medioambiental.

### 7.3 ALGAS GENERADORAS DE ENERGÍA

Las algas son unas plantas que se reproducen tanto en agua salada como en agua dulce, y éstas siguen sus ciclos sin necesidad de siembras, trasplantes, abonos, riegos, ni tratamientos con pesticidas, puesto que éstas poseen el

pigmento verde llamado clorofila y son capaces de producir su propio alimento mediante la fotosíntesis necesitando sólo de la luz solar para desarrollarse.

La gran mayoría las algas se desarrollan en agua salada. A pesar de que se conocen por lo menos unas 25.000 especies de algas, sólo unas pocas son utilizadas como alimento o con usos medicinales (Martín@).

Sin embargo estas plantas no sólo sirven pueden emplearse con fines medicinales o como alimento, sino que también puede utilizarse para la generación de energía. Las algas que comúnmente se encuentran en los estanques, llamadas científicamente *Chlamydomonas reinhardtii*, son algas unicelulares fotosintéticas que pueden reproducirse incluso en estanques con presencia de lixiviados.

Estas algas son capaces de descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, aumentando de manera importante el rendimiento de este proceso que se suele llevar a cabo en un laboratorio a través de la electrólisis, lo que hace pensar en la posibilidad de comercializar el hidrógeno que se produce de esta manera, para generar energía.

Estudios realizados en Australia, han demostrado que modificando el ADN de este tipo de algas, es posible aumentar la eficiencia en la captura de luz solar, destinada a la producción de hidrógeno.

Hoy en día sólo hay investigaciones sobre el tema, pero se espera que con el hidrógeno producido, sea posible reemplazar los combustibles fósiles actuales, por combustibles más ecológicos, proveniente de las algas (Axxón@, 2002).

#### 7.4 IRRIGACIÓN

La irrigación, consiste en aportar agua en forma de riego en un terreno determinado. Dentro de los riegos, la agricultura es el uso que mayor demanda de

agua tiene a nivel mundial. El riego de tierras agrícolas utiliza hasta un 70% de los recursos hídricos en el mundo. En los países subdesarrollados, el agua que se emplea para la irrigación, muchas veces, representa hasta el 95% del total de usos del agua, y juega un papel esencial en la producción y seguridad de los alimentos.

El uso eficiente del agua es una exigencia por parte de los gobiernos del mundo, puesto que al tratarse de un recurso natural debe aprovecharse de manera sostenible, por lo que se ha visto la necesidad de recircular el agua para fines como la agricultura.

El agua que se emplea para el regadío, puede provenir tanto de fuentes naturales, donde se incluyen el agua lluvia y las aguas superficiales de escorrentía, como de fuentes alternativas, como las aguas residuales.

Cuando se reutilizan las aguas es importante tener en cuenta la aplicación o uso que se le dé al agua reciclada, las características y limitaciones del suelo, las condiciones climáticas entre otros.

La calidad de agua reciclada para puede ser determinada mediante análisis de laboratorio. Los factores más importantes que se deben tener en cuenta para verificar que el agua reciclada puede ser usada para fines agrícolas son los siguientes (Lenntech@, 2009):

- PH
- Riesgo de salinidad
- Riesgo de sodio (Relación de absorción de sodio o RAS)
- Riesgo de carbonato y bicarbonato en relación con el contenido en Ca & Mg
- Elementos traza
- Elementos tóxicos



- Nutrientes
- Cloro libre

Con esto se ve claramente que algunas aguas residuales, inclusive algunas aguas con bajos contenidos de lixiviados, pueden ser reutilizadas con un pequeño tratamiento o incluso sin un tratamiento previo. Lo que deben garantizar es que la calidad del agua para su uso determinado.

## 8. PROBLEMAS CONCRETOS DEL MEDIO.

El problema de la generación de lixiviados, se da por igual en todas las sociedades, y aunque no puede eliminarse por completo, sus impactos se pueden disminuir.

Los lixiviados generados al igual que las aguas residuales, serán vertidos, ya sea de forma puntual o no puntual, a diferentes cuerpos de agua, por lo que en Colombia, la legislación requiere que se aseguren las características de vertimiento dadas en el Decreto 1594 de 1984, en el Artículo 72, y de ser vertidas a un alcantarillado público, con las normas dadas en el Artículo 73 del mismo decreto. Además, la descarga de lixiviados debe cumplir con los requisitos del Artículo 11 del *Decreto 838 de 2005*.

Para que estas normas sean cumplidas, estos líquidos deberán ser tratados con diferentes métodos y tratamientos, que fueron explicados con anterioridad en el capítulo 5 de este proyecto.

Este capítulo es un estudio de caso, en el cual se busca describir y dar solución a la generación de lixiviados y aguas residuales de dos problemas concretos del medio. Haciendo énfasis en los métodos y tratamientos más viables para manejarlos.

### 8.1 CENTRO INDUSTRIAL DEL SUR - CIS

El Centro Industrial del Sur, es uno de los sitios de disposición final de residuos sólidos del área metropolitana antioqueña, que se encuentra ubicado en el municipio de Heliconia, donde las precipitaciones promedio están entre 1.000 y 2.000 mm anuales. Este relleno sanitario que empezó a operar en el año 2006, fue mencionado con anterioridad en el capítulo 3.2 de este proyecto, *Disposición de Residuos Sólidos en el Área Metropolitana*.

El Guacal, cuenta con una capacidad instalada para recibir hasta 1.200 toneladas al día, sin embargo actualmente recibe 800 toneladas al día de residuos sólidos aproximadamente, y cuenta dentro de sus instalaciones con diferentes procesos, como lo son el pesaje, la planta de separación de residuos, la planta de compactación y la planta de tratamiento de lixiviados.

El Centro Industrial del Sur, lleva a cabo una serie de métodos y procesos para tratar los lixiviados que se generan en el Relleno Sanitario El Guacal. Sin embargo, éstos podrían no ser los más adecuados o eficientes para este caso. Para evaluar esta posibilidad y conocer la operación del relleno sanitario, se realizó una visita el día 5 de febrero del 2010, guiada por el ingeniero geólogo e ingeniero civil, Carlos Mejía, quien actualmente es el Director Operativo de la empresa EVAS S.A.

La producción actual de lixiviados en el CIS El Guacal es en promedio de 0.98 litros por segundo, el cual tiende a aumentar cuando llueve. Para el manejo y tratamiento de los lixiviados El Guacal cuenta con una planta, la cual tiene siete sistemas de tratamiento entre los que se utilizan procesos químicos, físicos y biológicos. La capacidad instalada máxima de los procesos de tratamiento es en general de  $87 \text{ m}^3/\text{día}$ , lo que equivale aproximadamente a 1 litro por segundo, casi el total del caudal de lixiviados producido en el relleno sanitario actualmente.

El diseño de esta planta de tratamientos de lixiviados fue realizado en conjunto por la empresa EVAS y por TECO, Tecnologías Ecológicas.

La autoridad ambiental competente, en este caso Corantioquia, exige que se remuevan el 80% de la demanda biológica de oxígeno (DBO), el 80% de la demanda química de oxígeno (DQO) y el 80% de los sólidos suspendidos totales (SST).

En la planta de tratamientos de lixiviados de El CIS, logra removerse hasta el 95% de la DBO, el 97% de la DQO y el 99% de los SST, por lo que se cumple más que de sobra con los requerimientos de la legislación ambiental, según lo reportado por la empresa.

Los procesos con los cuales cuenta la planta de tratamientos se muestran y explican detalladamente a continuación.

- Recolección de lixiviados.

Se recogen tanto los lixiviados del descargue de los camiones que transportan los residuos, como los que se generan después de la compactación de los desechos sólidos en la planta de separación de residuos, y los que se generan en el vaso del relleno sanitario. Para esto se utilizan una serie de canales y ductos que transportan los lixiviados por gravedad hasta la planta de tratamiento. Debido a que el lixiviado es extremadamente corrosivo, en su mayoría, los canales están hechos de PVC de presión entre 12 y 18 pulgadas de diámetro.

Para evitar que las precipitaciones aumenten el caudal de los lixiviados, se diseñaron unos ductos laterales para el manejo de las aguas lluvias. De igual manera, se taparon las entradas de lixiviados, poniéndole un techo al tanque donde llegan los lixiviados que se recogen del vaso, como se ilustra en la Figura 19, y se cubrió en algunas partes con membrana sintética, el relleno sanitario, evitando que el agua lluvia pase a través de este, generando mayor cantidad de lixiviados.

Figura 19. Techo tanque recogida de lixiviados.



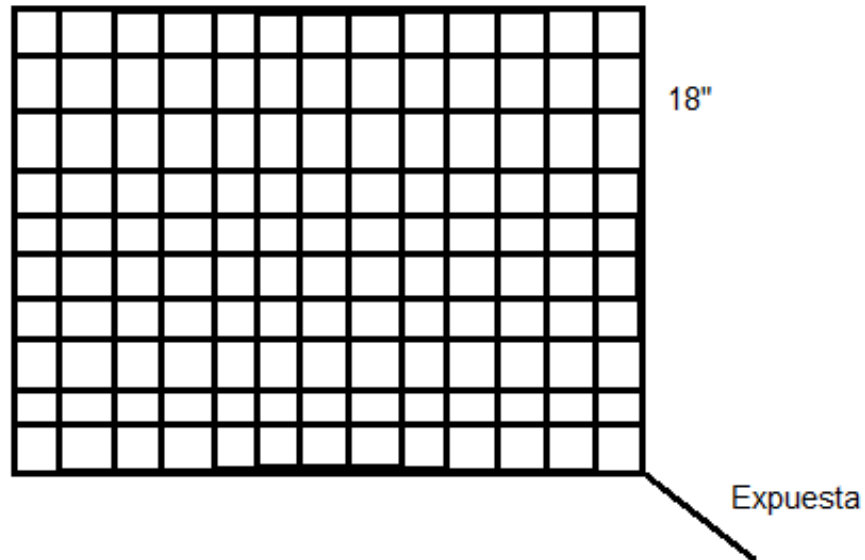
Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.

Para realizar la recolección de los lixiviados que se generan en el vertedero, se utiliza un diseño de cuadrícula y no de espina de pescado como se hace normalmente, que se encuentra puesto sobre el talud, debajo de la montaña de desechos sólidos.

El diseño de cuadrícula, cuenta con retícula de tubería de PVC de presión, de 12 y 18 pulgadas de diámetro, que tienen perforaciones en la parte superior, por donde el lixiviado penetra y es dirigido a la tubería principal, que lo lleva a la planta de tratamiento. Con este diseño se busca que si alguna tubería se tapona, el lixiviado podrá circular por cualquiera de las otras hasta llegar al filtro de cierre como se ilustra en la Figura 20.

Debajo del diseño de cuadrícula, hay una geomembrana que impide el paso del lixiviado al suelo.

Figura 20. Diseño de cuadrícula.



(Mejía, 2010).

Los lixiviados que se generan en la planta de compostaje son recogidos y reutilizados para regar el mismo compost, generando una actividad alta de bacterias, al igual que los que se generan en el lombricultivo que también son recolectados y reutilizados para regar el lombricultivo; por lo que estos lixiviados no van a la planta de tratamiento.

- Filtro primario.

Es un proceso preliminar que busca eliminar los residuos que pueden separarse con facilidad, y preparar el lixiviado para los tratamientos posteriores. Además ayuda a evitar la generación de daños en los equipos mecánicos y las tuberías, que pueden darse por incrustaciones.

En este proceso físico de piedras se separan los residuos sólidos más grandes y pesados contenidos en los lixiviados, como lo son la sílice, los metales y la arena.

Los materiales que se salen de este proceso, se recogen y se mezclan con los lodos resultantes al final del tratamiento de los lixiviados.

Figura 21. Filtro primario.



Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.

- Laguna de oxidación.

Es un proceso biológico donde las bacterias se encargan de descomponer y alimentarse de la materia orgánica presente en los lixiviados. Este proceso tarda aproximadamente 4 días.

Con cinco metros y medio de profundidad, la laguna de oxidación tiene capacidad para almacenar el lixiviado que se genera en el CIS El Guacal hasta por 46 días, en caso de que ocurra algún daño en la planta de tratamientos.

En la siguiente tabla, se hace una revisión de la capacidad de la laguna de oxidación teniendo en cuenta las dimensiones reales de ésta.

Tabla 7. Laguna de oxidación El Guacal.

Tiempo total	Días	46
Tiempo total	Segundos	3.974.400
Flujo	L/seg	0,98
Volumen en el tiempo	Litros	3.894.912
Volumen en el tiempo	m <sup>3</sup>	3.895
Profundidad	m	5,5
Área	m <sup>2</sup>	708
Lado 1	m	20
Lado 2	m	35
Volumen laguna	m <sup>3</sup>	3.894

De acuerdo a los datos de la Tabla 7, puede observarse que la capacidad de la laguna de oxidación, realmente puede almacenar los lixiviados por 46 días.

Figura 22. Laguna de oxidación.



Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.



- Reactor anaerobio de flujo ascendente, UASB.

Como se explica en el Capítulo 5 de este proyecto, este es un proceso biológico que se lleva a cabo dentro de un tanque, que se encuentra lleno de lodo, por el cual el lixiviado circula de abajo hacia arriba, donde se degradan anaerobiamente los microorganismos, y se agrupan. El líquido clarificado sale por la superficie del tanque.

El UASB debe mantenerse a temperaturas cercanas a los 29°C y 32°C, donde las bacterias tienen un mejor comportamiento, por lo que en El Guacal, donde la temperatura promedio del ambiente es de 14°C, se debe aislar el reactor con celulosa para mantener la temperatura dentro de los rangos deseados.

Figura 22. Reactor anaerobio de flujo ascendente.



Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.

- Mezcla rápida con cal.

Proceso físico químico, donde por medio de agitación se mezcla el lixiviado con cal hidratada que fue previamente mezclada con agua, generando un lodo que más adelante, en el desarenador, se separa del líquido. Sólo el 66% de la cal reacciona, el resto de ésta queda suspendida como un sólido, que también se separa del líquido en el desarenador.

Figura 23. Mezcla rápida con cal.



Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.

- Desarenador final.

Es una estructura hidráulica en la cual se remueven las partículas sólidas presentes en los líquidos, en este caso en especial, lo que se busca es con este proceso es separar el lodo que fue generado en la mezcla rápida con cal, del líquido.

Figura 24. Desarenador final.



Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.

- Laguna de aireación.

Por medio de un motor se genera turbulencia, con lo que se hace un atrapamiento de oxígeno, se terminan de separar los lodos del líquido que ya está totalmente tratado, al cual se le removi6 el 95% del DBO, el 97% del DQO y el 99% de los SST.

Los lodos que quedan como residuo del tratamiento de lixiviados, se deben analizar verificando que no contengan metales pesados en altas concentraciones para disponer de ellos como residuos ordinarios. Si por el contrario, al analizar dichos lodos se encuentran grandes concentraciones de metales pesados, 6stos deber6n disponerse en celdas de seguridad junto con los residuos peligrosos.

Hasta el momento el Centro Industrial del Sur, ha realizado estudios con una empresa para analizar los contenidos de los s6lidos, que dio como resultado que los lodos no tienen altos contenidos de metales pesados, ni de residuos

peligrosos, sin embargo, la corporación autónoma regional, Corantioquia, no considera a dicha empresa como certificada, por lo que solicitó un nuevo estudio.

Hasta que no se cuente con estos resultados, no se podrán disponer esos lodos en el Guacal, y deben ser transportados hasta un relleno que cuente con una celda de seguridad.

Figura 25. Laguna de aireación.



Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.

- Descarga de lixiviados.

Los lixiviados, una vez han pasado por la planta de tratamientos, son vertidos en la Quebrada Los Morros.

Las características de salida de los lixiviados son monitoreadas cada 6 meses, tanto por el Centro Industrial del Sur, como por la corporación autónoma regional, Corantioquia, para asegurar la calidad de vertimiento que es requerida por la legislación ambiental.

Sin embargo este monitoreo no parece ser coherente, puesto que si no se realiza un seguimiento y control de las variables de entrada y salida del lixiviado, al menos de forma semanal, verificando que se cumplan con los requerimientos de

vertimiento dados por la legislación ambiental, no se podrán corregir de forma inmediata los impactos negativos.

En la Figura 26 se puede observar la apariencia que tiene el lixiviado una vez que ha recibido los tratamientos que se mencionaron con anterioridad. En esta imagen el lixiviado aún no ha pasado por la laguna de aireación, y aún tiene presencia de sólidos, especialmente de partículas de cal.

Figura 26. Apariencia del lixiviado tratado.



Foto tomada en El Centro Industrial del Sur, 2010.

De acuerdo con los datos suministrados en El Guacal, la planta de tratamientos de lixiviados, que tiene una capacidad instalada para tratar máximo  $87 \text{ m}^3$  al día, se encuentra operando al 97,32%, ya que actualmente la producción de lixiviados de dicho relleno asciende a 0.98 litros por segundo, que equivale a  $84.67 \text{ m}^3$  al día, esto sin tener en cuenta que este caudal tiende a aumentar debido a las precipitaciones del lugar.

Por lo tanto, a continuación se hace una contrapropuesta para el tratamiento de los lixiviados generados en El Centro Industrial del Sur, que incluye una serie de procesos biológicos y físico- químicos. Aunque la idea de éste proyecto no es realizar un diseño de una planta de tratamiento de lixiviados.

A pesar de que es necesario conocer no sólo el caudal que se maneja, sino también la caracterización de los lixiviados, para determinar los tratamientos más efectivos para tratar estos líquidos, esta información por políticas internas de la empresa, no pudo ser suministrada, por lo que esta propuesta se basará en lo que se espera que contengan los lixiviados provenientes de residuos sólidos domiciliarios, considerando además que el relleno sanitario tiene 4 años de edad.

Debido a que los residuos sólidos del relleno sanitario El Guacal son en su mayoría residuos domiciliarios provenientes de una ciudad en vía de desarrollo, puede esperarse que los lixiviados contengan altos contenidos de materiales orgánicos, con lo que los tratamientos más recomendables serán entonces, los biológicos. Sin embargo, posterior a estos tratamientos, será necesario implementar otros procesos físico químicos, para obtener una depuración total de los componentes contaminantes de los lixiviados.

- Recolección de lixiviados.

El sistema de recolección con el que actualmente cuenta el relleno sanitario El Guacal, está bien diseñado, y los problemas que anteriormente se presentaban, de fugas y filtraciones ya han sido corregidos, por lo que no se hace recomendación alguna sobre alguna modificación. Sin embargo, se hace énfasis en llevar a cabo un seguimiento y control periódico que permita verificar el buen funcionamiento, y detectar las posibles infiltraciones y fugas a tiempo, para ser corregidas de inmediato.

La ubicación de la planta de tratamiento de lixiviados, se encuentra bien situada puesto que permite que los lixiviados recolectados, sean conducidos a ésta por gravedad.

- Pre-tratamiento.

Para empezar, el lixiviado debe ser sometido a un pre-tratamiento, donde se eliminan algunos de los residuos y sólidos que son fácilmente removibles, como la arena, gravilla, y grasas, que de no ser retirados puedan llegar a causar incrustaciones en la maquinaria y equipos, causando daños y atascamientos.

Para tal fin, pueden emplearse dos desarenadores, para que el proceso pueda ser continuo, de manera que mientras el uno se encuentre en funcionamiento el otro podrá ser limpiado.

En este proceso, se alcanzarán remociones de grasas y aceites hasta del 80%. La remoción de sólidos, sin embargo, es mucho menor, puesto que por lo general hay mayor cantidad de sólidos finos que no logran ser removidos en este proceso.

- Tratamiento primario.

Para este tratamiento se emplean normalmente procesos biológicos, que degraden el material orgánico presente en los lixiviados. Para este caso, es bueno utilizar una laguna de estabilización aerobia, que permita degradar la materia orgánica, con el uso de sopladores que produce burbujas, creando una biomasa, y manteniendo a flote los sólidos y lodos. Para garantizar que la biomasa tenga las condiciones necesarias para ser capaz de consumir la materia biodegradable presente en los lixiviados, es necesario que se controlen especialmente el pH, el oxígeno disuelto y la temperatura. Para controlar el pH, podrá ser necesario la adición de químicos, antes de que los lixiviados ingresen a la laguna.

En este tipo de tratamiento, se logra eliminar de forma eficiente el amoníaco y, además, se reduce la DQO, los plaguicidas, los metales, los sólidos en suspensión y el metano disuelto. Este sistema resulta más rápido que la laguna anaerobia, proceso actualmente empleado en el relleno sanitario, y no se producen tantos olores contaminantes, y es igualmente capaz de contener gran volumen de lixiviados.

Para mejorar el efecto de la laguna aerobia, se puede emplear un clarificador, que ayude a sedimentar los sólidos que aún estén presentes en el lixiviado, separando los sólidos de los líquidos, logrando hasta un 70% de remoción de sólidos.

Los sólidos se precipitan al fondo, generando unos lodos, que son retirados y que posteriormente pueden ser sometidos a un proceso de filtro prensado para reducir de manera significativa su humedad, o pueden ser dispuesto en un lecho de secado.

- Tratamiento secundario.

Mediante un proceso físico químico, se remueven otros contaminantes presentes en los lixiviados, que aún no fueron retirados en los procesos anteriores. En el caso de El Guacal, puede emplearse un proceso compuesto de tres partes, floculación, coagulación y filtración, donde mediante la adición de algunos químicos coagulantes y floculantes, se logran eliminar los coloides y algunos metales presentes en el agua sedimentada.

Una vez dichos sólidos son retirados, el líquido resultante se hace pasar a través de un medio filtrante, dejando pasar el líquido y reteniendo los sólidos.



- Tratamiento terciario.

Para terminar de garantizar las características de vertimiento requeridas según la legislación ambiental vigente, deberá realizarse un último proceso físico químico como lo es la adsorción de carbón activo. Mediante este tratamiento se logran eliminar las partículas solubles del líquido resultante, cuando éstas se adhieren al carbón activo granular (GAC).

Este proceso puede llegar a convertirse en el cuello de botella de la planta de lixiviados, por lo que debe ser diseñado cuidadosamente, contando con la capacidad suficiente.

- Recirculación y vertimiento de líquidos resultantes.

El líquido tratado, podrá ser reutilizado en el mismo Centro Industrial, para procesos que no requieran aguas 100% potables, como lo son el riego, de plantas, el pre-lavado de equipos y maquinarias, entre otros.

## 8.2 COLORQUÍMICA S.A.

Colorquímica S.A. es una empresa productora y comercializadora de resinas, pigmentos, colorantes industriales, auxiliares químicos, colores y aditivos para alimentos, que fue fundada en Medellín en el año 1976.

La sede principal y las plantas de producción de Colorquímica se encuentran ubicadas en el municipio de La Estrella, en Antioquia (COLORQUÍMICA®, 2010).

Figura 31. Colorquímica S.A.



(COLORQUÍMICA@, 2010).

En la planta de producción de Colorquímica se llevan a cabo una serie de tratamientos a las aguas residuales, para cumplir con los requerimientos ambientales propuestos por las legislaciones locales e internacionales. Para conocer dichos tratamientos, se realizó una visita guiada por la ingeniera química Nidia Ospina, el día 8 de abril de 2010.

Las aguas residuales de COLORQUÍMICA S.A. son producto del lavado de equipos, tanques, implementos de seguridad, pisos, entre otros que se realizan de los procesos productivos. Estas aguas van a la planta de tratamientos de aguas residuales, ya sea por gravedad o con la ayuda de bombas. En la planta se realizan procesos de fisicoquímicos de coagulación – floculación, sedimentación y óxido reducción. Finalmente las aguas después de ser tratadas son conducidas al alcantarillado público de EPM.

El tratamiento de agua se da a todas los procesos de la empresa. Alimentos (colores y aditivos), pinturas, pigmentos, resinas, auxiliares químicos, colorantes industriales, bodega de materias primas y laboratorios.

Las aguas residuales generadas en las plantas de alimentos, pinturas, colorantes industriales, bodega de materias primas y laboratorio de 2do piso edificio, se descargan por gravedad a tanques intermedios de 10, 7, 15 y 5 m<sup>3</sup> de capacidad

respectivamente. Cuando se tiene entre el 60-80% de los tanques de aguas residuales intermedios llenos, el personal de las plantas de producción debe llamar a Planta de Aguas para solicitar autorización y bombear las aguas a la planta de tratamiento. El tanque intermedio de alimentos tiene un sensor de nivel, de manera que cuando llega al nivel máximo se prende una alarma y el personal de planta se comunica con Planta de Aguas para proceder a bombear.

La planta de tratamiento de agua tiene 6 tanques para almacenar las aguas residuales:

- Alimentos: se pueden almacenar en tanques de 14 y 20 m<sup>3</sup> ya que el 70% del agua tratada en Colorquímica proviene de la planta de alimentos.
- Pinturas: se almacena en tanque de 10 m<sup>3</sup>.
- Resinas: se almacena en tanque de 20 m<sup>3</sup>.
- Pigmentos, auxiliares, laboratorio Investigación y Desarrollo: se almacenan en un tanque 15 m<sup>3</sup>.
- Colorantes industriales, Bodega de materia prima y Laboratorio de 2do piso edificio: se almacena en tanque de 9.5m<sup>3</sup>. En este tanque también se puede almacenar agua de alimentos, esto dependiendo de las características del agua.

Para el proceso de las aguas residuales de la empresa se realizan dos procesos diferentes:

- 1) Para el tratamiento de aguas residuales de la planta de alimentos, se realiza una óxido reducción con hidrosulfito de sodio.
- Óxido reducción con hidrosulfito de sodio.

Proceso mediante el cual se produce una pérdida y ganancia de electrones por agentes oxidantes y reductores. Las aguas que se tratan acá son solubles con pocas cantidades de sólidos.

2) Para las demás aguas provenientes del resto de la planta, se realiza un tratamiento de coagulación- floculación-sedimentación.

- Test de jarras.

Primero se realiza un test de jarras con el cual se establece la cantidad de químico a dosificar en dichas aguas. Ésta Debe ser la óptima para lograr la separación.

- Coagulación.

Luego se adiciona el coagulante, proceso por el cual pequeñas partículas de floculo comienzan a aglomerarse en partículas de mayor tamaño las cuales sedimentan más rápidamente. Estos coagulantes pueden ser sales inorgánicas (sulfato de aluminio, cloruro férrico, o policationes orgánicos).

- Floculación:
  - Después se adiciona el floculante, que permite sedimentar gran cantidad de sólidos suspendidos en el agua que se desea tratar, ya que une los coágulos para que ganen peso y se sedimenten.
- Sedimentación.

Por último se realiza la sedimentación, donde la separación de los sólidos y los líquidos dura entre 2 y 3 horas. Al final el sedimento queda en la parte inferior y el agua clarificada queda en la parte superior.

- Recirculación y vertimiento de aguas.

Las aguas tratadas van a un mismo lugar en donde se verifica si cumple con las condiciones para ser reutilizada. Cuando no se tiene donde ser reutilizada en la planta, las almacenan para que otras empresas del sector las utilicen. Estas aguas especialmente se reutilizan para el lavado de la maquinaria, equipos, suelos e instalaciones de la empresa.

El resto de aguas tratadas que no sirven para el lavado de las instalaciones de la empresa, incluyendo las de la planta de alimentos, drenan a un dique que las envía al alcantarillado. Esto, siempre y cuando el agua cumpla con las normatividad pertinente.

- Lodos.

Por otro lado, los lodos que se generan en el tratamiento del agua son recogidos en unos costales, los cuales los recoge y dispone Interaseo S.A.

Teniendo en cuenta lo que se menciona con anterioridad, se puede decir que Colorquímica, es una empresa que cuenta con una planta de tratamientos adecuada para los procesos que desempeña. Puede observarse que a pesar que la planta tiene más de 20 años, cumple con los requerimientos exigidos por la ley para la descarga de agua al alcantarillado.

Algunas de las características a las que se les hace seguimiento y control de forma especial en la empresa, son el pH, garantizando que se encuentre entre 5 y 9 para la descarga al alcantarillado, los sólidos suspendidos totales, para asegurar que sean removidos al menos el 50%, y el color, puesto que puede llegar a contaminar las aguas de forma notoria. Para el control del color se tienen unos estándares, que sirven como base a la hora de analizar el agua.

Los procesos que utiliza Colorquímica, no sólo garantizan las características requeridas para la descarga del agua, sino que están muy acordes con los procesos recomendados en la bibliografía para este tipo de industrias, mencionados en el capítulo 6.

Para Colorquímica las aguas críticas son las de alimentos, ya que representan el 70% de las aguas residuales de la empresa.

Sin embargo, existen otro tipo de tecnologías que pueden ser empleadas para el tratamiento de las aguas residuales de Colorquímica, tanto para las aguas de alimentos, como para las demás aguas de la empresa. A continuación se muestran estas tecnologías, y se especifican sus ventajas y desventajas para el caso específico de la empresa.

#### 8.2.1 Aguas de la planta de alimentos

- Nanofiltración (NF).

Como se expresa en el capítulo 5, la nanofiltración es un proceso de filtración mediante el uso de membranas. Este proceso se realiza mediante la aplicación de presión al agua a tratar. Los solutos de bajo peso molecular (iones divalentes) son retenidos en la membrana, pero ésta deja pasar sales de forma parcial o total.

La recuperación de soluciones cáusticas y ácidas es una de las utilidades de la nanofiltración. Como lo es también la eliminación de colores en aguas salobres y de COT. Una gran ventaja frente a otros sistemas de desalinización, es que la nanofiltración presenta un ahorro energético al trabajar a bajas presiones.

Todos los materiales con los que se construye esta membrana son cuidadosamente seleccionados con el fin de alcanzar:

- 95% Recuperación de Cáustico.

- 90% Reducción de DQO.
- 95% Ahorro Energía (calor) y Agua.
- 80 al 90% Reducción de Calcio.
- Operación hasta 70°C de Temperatura.
- Rangos entre 1 a 14 de pH.

Las membranas pueden aplicarse a los siguientes sistemas:

- Lavado Evaporador (CIP) Lácteos.
- Alimentos, Lácteos y Bebidas.
- Lavada Tubería (CIP) Lácteos.
- Lavado Caústico en Cerveza y Bebidas.
- Columna de Resina PVPP.
- Reciclado de regeneración de Intercambio Iónico.
- Reciclado de Agua de Lavados en Alimentos.
- Desmineralización de Suero.
- Desmineralización de Jugo, Decolorado.
- Recuperación de Azúcares.
- Color Natural, Desazucarado.
- Vitaminas, Desazucarado.

Por estas ventajas que posee la nanofiltración, para Colorquímica sería una gran ventaja contar con una tecnología tan avanzada como ésta para la planta de tratamiento de aguas residuales proveniente de la planta de alimentos, ya que se podría pensar en obtener agua reutilizable.

Sin embargo, hay algunas desventajas considerables que deben tenerse en cuenta, puesto que si bien estas membranas poseen una excelente estabilidad a largo plazo, en soluciones tales como Hidróxido de Sodio, Hidróxido de Potasio, Ácido Fosfórico y Ácido Nítrico en concentraciones del 10 % o mayor, esta excelente estabilidad se obtendría a largo plazo y en Colorquímica, las aguas de

la planta de alimentos son supremamente críticas ya que se tratan en promedio entre 70 – 85 metros cúbicos de agua residual de esta planta al día. Por lo cual, se requerirían grandes espacios para almacenar esa cantidad de agua por largos períodos.

Otra de las grandes desventajas de esta planta sería el costo. Esta es una de las tecnologías más modernas y complejas, por lo tanto su costo es muy elevado.

Pero a pesar de las desventajas de esta tecnología, sería importante realizar un estudio técnico-económico, en donde se tengan en cuenta todas las variables, ya que el agua tratada por este tipo de tecnologías puede reutilizarse inclusive dentro de los mismos procesos de la planta de alimentos, la cual trabaja actualmente con agua 100% EPM.

#### 8.2.2 Aguas del resto de la empresa.

Para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del resto de la planta de Colorquímica, se sugiere continuar con los procesos actuales, sin embargo, se hace la recomendación de sustituir el la coagulación existente por la electrocoagulación, como se indica a continuación.

- Electrocoagulación:

La electrocoagulación es un proceso electroquímico de coagulación, donde a diferencia de los coagulantes corrientes, se utiliza corriente eléctrica a través de placas metálicas paralelas. Este tratamiento puede ser muy eficiente para la remoción de una gran variedad de contaminantes.

En este tipo de coagulación, el paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas más pequeñas, se crean flóculos más grandes que los creados por la coagulación química. Si se llegase a utilizar esta coagulación en Colorquímica se favorecerían los procesos siguientes, ya que la floculación y sedimentación se haría mucho más rápida y eficiente debido a la ganancia de



peso de los flóculos. También sería mucho más probable que toda el agua que salga después del proceso sea reutilizable e inclusive se podría pensar en un agua más pura que sirva para otros procesos adicionales al lavado de maquinaria, equipos, suelos y demás.

A pesar de los beneficios que trae la electrocoagulación, la implementación de esta tecnología suele resultar más costosa que la que se emplea en el momento en Colorquímica, y el proceso suele arrojar los mismos resultados.

No obstante, no se puede descartar esta tecnología, ya que en algún momento dado, Colorquímica puede ampliar la producción de cualquiera de las plantas que tratan sus aguas con la coagulación química, y en ese instante es probable que la planta necesite un proceso más rápido y eficiente que incremente su capacidad.

- Intercambio iónico.

Como se menciona anteriormente en el capítulo 5, el intercambio iónico es una reacción química reversible, que se da cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión e igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil.

El proceso de intercambio iónico permite mediante el paso del agua a través de una resina sólida, sustituir por iones de sodio, los iones de calcio y magnesio, formando sales solubles.

El intercambio iónico es una buena tecnología, ya que con esta se puede conseguir eliminar algunos sólidos suspendidos y materia orgánica que quede después del tratamiento con coagulación – floculación – sedimentación. Este tratamiento se emplearía como complementario al proceso ya existente en Colorquímica, ya que la exigencia de este intercambio iónico requiere que el agua residual haya recibido un pre-tratamiento.

Un inconveniente de este proceso, es que las resinas de intercambio iónico deben ser regeneradas con soluciones cada vez que se saturan, pues pierden su efectividad con el uso.

### 8.3 OTRAS VISITAS

Se realizaron dos visitas a empresas adicionales, con el propósito de documentar los métodos que se emplean para tratar las aguas residuales de otro tipo de industrias. En este caso se visitó una empresa de alimentos avícolas y una lavandería industrial, como se muestra a continuación.

#### 8.3.1 ALIMENTOS FRIKO S.A.

Alimentos Friko S.A es una compañía que se estableció en el año 1979, que se proyecta como una de las más competitivas del sector alimenticio colombiano, en la producción y procesamiento de pollo y carnes frías de pollo.

La empresa Alimentos Friko S.A. se encuentra localizada en el municipio de Caldas, al sur del Valle de Aburrá. Cuenta con lo último en tecnología tanto en incubación, levante, sacrificio, empaque final y distribución (Alimentos Friko S.A @, 2009).

Los subproductos que se producen en la planta de alimentos, son aquellos que no son comestibles, pero que sí pueden ser procesados, tales como lo son los huesos, la sangre, las plumas y las vísceras de los pollos. Todos estos subproductos son vendidos a la empresa Agrosan S.A. para producir harina para concentrados de animales.

Figura 27. Alimentos Friko S.A



(Alimentos Friko S.A @, 2009).

Con el fin de conocer los procesos y tratamientos que se emplean en las diferentes industrias para el tratamiento de aguas residuales, se realizó una visita a la planta de Alimentos Friko S.A.

La visita se realizó el día 7 de abril de 2010, y fue dirigida por la señora María Isabel Álvarez, del departamento de Gestión Ambiental.

La planta de tratamiento de agua residual, fue diseñada por TEPESA, y se compone de las siguientes etapas.

- Pre-tratamiento para sólidos y grasas.

El afluente debe ser sometido a un pre-tratamiento donde se retiran sólidos y grasas, el cual se lleva a cabo en el tanque de subproductos o estación de bombeo. Se debe tener precaución de retirar la mayor cantidad de grasa y sólidos posibles.

- Homogenización y regulación de caudal.

Al tanque pulmón, le llega el agua del tanque de subproductos. Su función es homogenizar el desecho y regular el caudal de agua que va hacia las celdas de flotación.

- Cajas de Reparto.

Todo el sistema cuenta con dos cajas de reparto. La primera está ubicada antes de las celdas de flotación de grasa, la cual distribuye el caudal a cada celda según la capacidad de la misma. La segunda caja se encuentra ubicada antes del ingreso a los reactores. En ella se mezcla el efluente procedente de las celdas de flotación, se mezcla el caudal recirculado y se realiza la adición de cal (cuando es necesario). Posterior a ella, se encuentran ubicadas las tres canaletas palmer que permiten medir de manera exacta el caudal que ingresa a cada módulo. En estas canaletas se realiza el ingreso de las aguas provenientes del sistema de tratamiento de aguas domésticas.

- Celdas de flotación.

Su función es permitir que la grasa flote y se acumule sobre la superficie del agua para poder ser removida, mediante la adición de burbujas de aire que llevan la grasa hasta la superficie. Existen tres (3) celdas antes del reactor y una (1) como tratamiento final del efluente.

Figura 28. Celdas de Flotación.



Foto tomada en la empresa Alimentos Friko S.A. 2010.

- Reactores UASB.

El agua pasa primero por tuberías hacia las 7 cajas de distribución para repartir el flujo de agua residual de manera uniforme hacia los tres módulos del reactor UASB. El flujo dentro del tanque es ascendente.

El efluente se recogerá por medio de canaletas dentadas, dispuestas uniformemente en la parte superior del reactor; una canaleta por reactor. En el fondo del reactor se halla ubicado el manto de lodo, de tipo anaeróbico, el cual degrada la materia orgánica y la convierte en  $\text{CO}_2$ , gas metano y agua.

En este proceso, se mezclan las aguas residuales con las aguas domésticas.

Figura 29. Celdas de residuos de lodos.



Foto tomada en la empresa Alimentos Friko S.A. 2010.

- Recolección y quemado del gas.

El gas metano que se produce en el reactor anaerobio de flujo ascendente, UASB, es conducido a la tea donde es quemado (mediante un encendido manual), durante las 24 horas del día.

Figura 30. Quema de gas metano.



Foto tomada en la empresa Alimentos Friko S.A. 2010.

- Vertimiento de aguas tratadas.

Las aguas previamente tratadas son vertidas en la Quebrada La Miel, cumpliendo con todos los requerimientos de la legislación ambiental vigente.

Los procesos y tratamientos empleados en la planta de tratamientos de aguas residuales, logran una remoción entre el 98 y 99% tanto de los sólidos suspendidos totales, como de la demanda química de oxígeno, la demanda biológica de oxígeno y de las grasas y aceites presentes en las aguas.

Las características de salida del agua tratada son medidas cada seis meses con un laboratorio externo, y cada seis meses con laboratorio interno, para garantizar las condiciones y requerimientos de vertimiento dados por la legislación ambiental.

Los lixiviados que se producen en la planta de Alimentos Friko S.A. son mínimos por lo que son enviados a un pozo séptico.

### 8.3.2 WASH S.A.

Wash S.A. es una lavandería industrial que hace los acabados de productos textiles fabricados en otras unidades de producción. Su enfoque principal es el acabado de *blue jeans*.

Esta empresa se encuentra ubicada en el municipio de La Estrella, en Antioquia.

Se realizó una visita guiada a la planta, para conocer el tratamiento de aguas residuales, el día 30 de marzo del presente año.

En Wash S.A, el flujo de aguas residuales que se tratan diariamente varía mucho dependiendo de la cantidad de productos textiles que tengan para lavar. Este flujo diario puede variar entre 400 y 800 m<sup>3</sup>.

La planta de tratamiento de agua residual de Wash S.A., la cual fue diseñada por TEPSA, cuenta con diferentes procesos, como se ilustra a continuación.

- Separación de sólidos, draga.

Es un proceso primario en el cual se retiran los sólidos más grandes y pesados contenidos en las aguas residuales, como lo son arenilla y piedra pómez.



Figura 32. Draga.



Foto tomada en la empresa WASH S.A. 2010.

- Roto Shear.

Por medio de este tambor rotatorio, con malla de acero de 0,5 mm se retiran todos los sólidos que no fueron separados con anterioridad en la draga.

Figura 33. Roto Shear.



Foto tomada en la empresa WASH S.A. 2010.

Los residuos provenientes de este proceso, que se observan en la Figura 34, son recogidos por la empresa Interaseo S.A.

Figura 34. Residuos sólidos proceso roto shear.



Foto tomada en la empresa WASH S.A. 2010.

- Tanques de homogenización.

El agua que sale del roto shear, pasa a dos (2) tanques, cada uno con capacidad de 150 m<sup>3</sup>, donde se almacena y se homogeniza el agua para los tratamientos posteriores.

- Serpentín.

Una vez el agua ha sido homogenizada, ésta se bombea y se hace pasar a través de un serpentín donde se adicionan químicos como sulfatos de Aluminio y polímeros catiónicos, para neutralizar su pH. En este proceso se cuenta con un pH-metro en línea, donde constantemente se mide el pH del agua para conocer las cantidades de químicos a adicionar.

El serpentín ayuda a que se generen choques de manera que el tratamiento ejerza efecto.

Figura 35. Serpentín.



Foto tomada en la empresa WASH S.A. 2010.

- Celdas de flotación.

La planta de tratamientos de agua residual cuenta con dos (2) celdas de flotación, con capacidad cada una de 50 m<sup>3</sup>, y capacidad de tratamiento nominal de 40 litros por segundo.

En este proceso, que demora de 20 a 30 minutos, se generan burbujas con la ayuda de unas bombas, que hacen que los lodos (índigo y otros tipos de sólidos) presentes en las aguas suban a la superficie, y floten. De esta manera pueden ser retirados con la ayuda de un raspador.

Figura 36. Celdas de flotación.



Foto tomada en la empresa WASH S.A. 2010.



- Filtros.

El agua que sale de las celdas de flotación, se hace pasar por dos (2) tipos de filtros, de arena y antracita, y de carbón activado, donde el agua finalmente sale con las características esperadas de pH, alcalinidad, conductividad, dureza y hierro.

Figura 37. Filtros.



Foto tomada en la empresa WASH S.A. 2010.

- Reutilización y vertimiento de aguas.

Las aguas tratadas, pueden ser reutilizadas en los procesos de lavado, siempre y cuando éstas cumplan con las características de pH entre 6 y 7, conductividad de 2000 siemens por metro y hierro de máximo 0,5 PPM (partes por millón).

Si las aguas no cumplen con estas características, pero sí con las establecidas en la legislación ambiental para el vertimiento en el alcantarillado, éstas son

depositadas allí para que reciban un tratamiento posterior en la planta de San Fernando.

Si estas aguas no cumplen con los requerimientos, son sometidas a tratamiento nuevamente.

- Disposición de lodos.

Los lodos que se generan son dispuestos en un tanque de acondicionamiento que tiene un agitador, donde se les adiciona cal hidratada. Luego, por medio de una bomba de cavitación positiva, estos lodos son enviados al filtro prensa, donde se prensa en pastas, retirando un alto porcentaje de humedad.

Figura 38. Flitro prensa lodos.



Foto tomada en la empresa WASH S.A. 2010.

Estas pastas son recogidas por la empresa Interaseo S.A. ya que estos no contienen características peligrosas.

## 9. CONCLUSIONES

- Los lixiviados son aquellos líquidos producto de la descomposición de la parte orgánica de los residuos sólidos, y de la percolación del agua lluvia a través de los desechos, arrastrando consigo sólidos en suspensión como materiales biológicos y componentes químicos. Por lo tanto la caracterización y concentración de los lixiviados, se encuentra directamente relacionada con la composición de los desechos, la edad del relleno sanitario del cual provengan, el grado de compactación de los residuos, las precipitaciones y el clima de la región.
- Los lixiviados se consideran como una amenaza tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas, debido a las altas concentraciones de contaminantes que pueden contener, como compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos y alcoholes. El medio ambiente en especial, puede verse afectado por los fuertes olores y los gases que generan los lixiviados que pueden dañar la fauna y la flora, la contaminación de los suelos y las aguas subterráneas una vez que éstos líquidos los penetran, y el gran impacto paisajístico que se genera.
- Existen a nivel mundial diferentes legislaciones y políticas de protección que ayudan a mitigar y a prevenir los impactos ambientales producto de la contaminación de los lixiviados. En estas normas se disponen los tratamientos, manejos y requisitos de vertimiento que deben cumplir todas las empresas e industrias que generen lixiviados, garantizando la preservación y conservación de los recursos naturales. En Colombia especialmente, la autoridad ambiental ha creado varios decretos para este fin, como lo son el Decreto 838 de 2005, sobre la disposición final de residuos sólidos y otras disposiciones, el Decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005, por el cual se reglamenta parcialmente la

prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, y el Decreto 1594 de 1984 donde se especifican las características de vertimiento que deben cumplir las aguas residuales.

- Para el manejo de los lixiviados existen diversos tipos de tratamiento de diferentes niveles tecnológicos, que varían entre biológicos, físico químicos, avanzados con membranas y de bajo coste como puede ser la recirculación. Como punto de partida para elegir un tipo de tratamiento a emplear, es necesario conocer la composición de los lixiviados, haciendo una caracterización física, química y microbiana, donde se conozcan como mínimo el caudal, la DBO, la DQO, la cantidad de nitrógeno, fósforo y metales pesados, con el fin de saber la aptitud que dichos líquidos tienen para el crecimiento bacteriano.

No existe un único tratamiento con el cual pueda removerse toda la carga contaminante presente en los lixiviados, por lo que deben emplearse varios procesos de forma conjunta.

Si bien la ósmosis inversa se considera como uno de los tratamientos más eficientes para tratar los lixiviados, sus altos costos lo hacen inoficioso en países subdesarrollados.

La recirculación de los lixiviados al relleno sanitario, sólo debe hacerse en lugares secos y de baja pluviometría y alta evaporación por efectos de la temperatura ambiente, de lo contrario las consecuencias pueden llegar a ser irreversibles, afectando la estabilidad del relleno y aumentando la generación de gases.

Los lixiviados jóvenes, que son aquellos provenientes de rellenos sanitarios o vertederos con menos de dos años de operación, se caracterizan por tener una



alta carga orgánica, por lo que los procesos biológicos resultan más eficientes para tratarlos.

Los lixiviados maduros por su parte, que provienen de rellenos sanitarios con más de diez años de funcionamiento, contienen menor carga biodegradable, por lo que los métodos que más beneficiosos pueden resultar a la hora de tratarlos son los tratamientos físico-químicos

- Los lixiviados, debido a sus altas concentraciones de contaminantes orgánicos, pueden ser empleados en diferentes aplicaciones, como lo son el compostaje, la irrigación y la generación de energía a partir de bacterias y algas. La reutilización de los lixiviados tratados, puede dar como resultado, un punto de equilibrio económico entre las ganancias generadas y los gastos en que se incurre para dicho tratamiento.
- La propuesta para el sistema de tratamiento de los lixiviados procedentes del relleno sanitario El Guacal, cuenta con las etapas de pre-tratamiento donde por medio de un desarenador se remueven sólidos y grasas, tratamiento primario donde se degrada el material orgánico en una laguna de oxidación aerobia, tratamiento secundario que cuenta con un proceso de sedimentación, coagulación, floculación y filtración, removiendo de forma efectiva los sólidos presentes en el líquido, y de un tratamiento terciario de adsorción por carbón activado, para pulir el líquido resultante.

Este sistema de tratamiento presenta como principal ventaja el incremento en el caudal que puede ser tratado. La propuesta tiene en cuenta además el tratamiento de los lodos generados en el proceso, y la recirculación y vertimiento de los lixiviados tratados.

- La empresa Colorquímica cuenta con una planta de tratamientos de agua adecuada para los procesos que desempeña, sin embargo la planta de alimentos requiere la utilización de grandes cantidades de agua potable que generan gastos elevados a la compañía. Por esto se buscaron soluciones a este problema.

Para la empresa Colorquímica, se recomienda realizar un estudio técnico económico para la implementación de la tecnología de nanofiltración, ya que la ejecución de este proyecto, arrojaría unos ahorros de agua sumamente considerables, partiendo de que actualmente Colorquímica genera entre de 70 y 85 metros cúbicos de agua residual al día de la producción de la planta de alimentos.

La electrocoagulación sería viable implementarla, siempre y cuando Colorquímica amplíe los procesos de las plantas que actualmente tratan sus aguas residuales con la coagulación química. La eficiencia no se vería afectada por el incremento en la cantidad del agua ya que la electrocoagulación agilizaría y mejoraría el proceso actual.

El intercambio iónico no sería una solución viable para implementar en Colorquímica, ya que sería una adición al proceso actual que se realiza para todas las plantas de la compañía exceptuando la planta de alimentos. Es cierto que mejoraría el proceso actual de las aguas tratadas por la coagulación, floculación y sedimentación, pero la empresa no tiene problema con esta agua, ya que ocupan solo el 30% de las aguas residuales de la compañía y los tratamientos actuales garantizan los requerimientos de vertimiento.

## 10. RECOMENDACIONES

A partir de este proyecto se pueden realizar muchas otras actividades en torno al tema de los lixiviados, ya que éste es un tema muy amplio y de gran complejidad que puede seguir explorándose.

Si bien el proceso investigativo es importante, puesto que permite conocer de manera general los métodos y tecnologías empleadas a nivel mundial para el tratamiento de estos líquidos percolados, puede considerarse como un estudio preliminar que da paso a un estudio más profundo y detallado, en el que se involucren las mediciones y comparaciones de las principales variables, como lo son  $\text{DBO}_5$ , DQO, COT, SST, pH,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , metales pesados, entre otros, de acuerdo al método que se emplee. Este análisis más detallado puede ser de gran ayuda para dar solución de forma efectiva a las empresas y actividades generadoras de lixiviados.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

*Alimentos Friko S.A @.* (2009). Recuperado el 10 de Abril de 2010, de Friko: <http://www.friko.com.co/>

AL-MEFLEH, M. N. (2003). *Investigación relativa a la minimización de lixiviados en vertederos y su depuración*. Madrid, España: Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

ANALIZA CALIDAD@, A. (s.f.). *Tratamiento de aguas residuales*. Recuperado el 20 de Febrero de 2010, de Analiza Calidad: <http://www.analizacalidad.com/aguas.pdf>

ANOXKALDNES@. (s.f.). *Eliminación de nitrógeno en procesos avanzados de tratamiento de aguas residuales*. Recuperado el 25 de Febrero de 2010, de Anoxkaldnes: <http://www.anoxkaldnes.com/Spa/c1prodc1/denitrification.htm>

Axxón@. (21 de Agosto de 2002). *Las algas ¿plantas motrices del futuro?* Recuperado el 20 de marzo de 2010, de Axxon: <http://axxon.com.ar>

BAIRD, C. (2001). *Química Ambiental*. Barcelona: Reverté S.A.

BARBOSA@, J. A. (14 de Septiembre de 2009). *Monografías*. Recuperado el 7 de Febrero de 2010, de Lodos Activados: <http://www.monografias.com/trabajos74/lodos-activos/lodos-activos.shtml>

BÓRDALO, A., HIDALGO, A., GÓMEZ, M., MURCIA, M., & MARÍN, V. (2007). Tecnologías de tratamientos de lixiviados de vertederos (I). *Ingeniería Química. Tratamiento de residuos.* , 1-8.

BÓRDALO, A., HIDALGO, A., GÓMEZ, M., MURCIA, M., & MARÍN, V. (2007). Tecnologías de tratamiento de vertedero (II). *Ingeniería Química. Tratamiento de Residuos.* , 204 - 211.

CAGLIANI, M. (4 de Agosto de 2009). Bacterias que producen electricidad. *Ecosistema. La revista de ambiente & negocios.*

CEPIS@. (2009). *CEPIS*. Recuperado el 5 de Febrero de 2010, de El relleno sanitario: [http://www.cepis.ops-oms.org/curso\\_rsm/e/unidades/unidad3.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/curso_rsm/e/unidades/unidad3.pdf)

CERÓN, R. (8 de Mayo de 2008). Generan energía con bacterias. *El universal, México* .

COLORQUÍMICA@. (2010). *COLORQUÍMICA*. Recuperado el 10 de Abril de 2010, de <http://portal.colorquimica.com.co>

Commonwealth of Pennsylvania@. (2001). *RESIDUAL WASTE LANDFILLS*. Recuperado el 10 de Abril de 2010, de Pennsylvania Code: [http://www.pacode.com/secure/data/025/chapter288/025\\_0288.pdf](http://www.pacode.com/secure/data/025/chapter288/025_0288.pdf)

DEPURADORAS@. (2009). *Depuradoras*. Recuperado el 9 de Febrero de 2010, de <http://www.depuradoras.eu/depuradoras-urbanas-biodiscos.html>

Diputados@. (19 de Junio de 2007). *LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS*. Recuperado el 16 de Febrero de 2010, de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263.pdf>

E.S.P@, E. S. (2009). *EVAS S.A E.S.P Manejo Integral de Residuos*. Recuperado el 3 de Marzo de 2010, de <http://www.evas.com.co/>

EEVV@. (15 de Septiembre de 2009). *Empresas Varias de Medellín E.S.P.* Recuperado el 1 de Marzo de 2010, de Relleno Sanitario Curva de Rodas: <http://www.eevvm.com.co>

EMISIÓN@. (s.f.). *EMISIÓN*. Recuperado el 22 de Febrero de 2010, de Compostaje: <http://www.emison.com/5143.htm>

EUR LEX@. (1999). Recuperado el 15 de Febrero de 2010, de [http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&type\\_doc=Directive&an\\_doc=1999&nu\\_doc=31&lg=es](http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&type_doc=Directive&an_doc=1999&nu_doc=31&lg=es)

G4moravia@. (2 de Mayo de 2007). *Historia de Moravia*. Recuperado el 1 de Marzo de 2010, de <http://g4moravia.blogspot.com/2007/05/historia-moravia.html>

GALLEGO, A., GEMINI, V. L., & KOROL, S. E. (2006). Sistemas aerobios de película biológica fija para la biodegradación de aguas residuales. *Revista argentina de microbiología*.

García, B. E., & Solís Fuentes, J. A. (2008). ¿Contaminando con sus jeans? *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad de Veracruzana*, Volúmen XXI, No. 1.

García, J. E. Centro Industrial del Sur. *ho*. El Guacal, Medellín.

GIRALDO, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*.

GREENPEACE@. (Septiembre de 2008). *@Greenpeace*. Recuperado el 10 de Enero de 2010, de Resumen de los impactos ambientales y sobre la salud de los rellenos sanitarios.: [www.greenpeace.org.ar](http://www.greenpeace.org.ar)

Hidritec@. (2009). *Hidritec Tecnología y gestión de recursos hídricos*. Recuperado el 15 de Marzo de 2010, de ELECTROCOAGULACIÓN: <http://www.hidritec.com/>

INFOAGRO@. (s.f.). *Infoagro*. Recuperado el 20 de Febrero de 2010, de El compostaje (Primera parte): <http://www.infoagro.com/abonos/compostaje.htm>

Lenntech@. (2009). *Calidad del agua para irrigación. Uso del agua para riego*. Recuperado el 15 de Marzo de 2010, de Lenntech Agua residual & purificación del aire Holding: <http://www.lenntech.es/>

LENNTECH@. (s.f.). *Water treatment solutions*. Recuperado el 20 de Febrero de 2010, de <http://www.lenntech.es/adsorcion-carbon-activado.htm>

MARSILLI@, A. (Diciembre de 2005). *Tierra Amor*. Recuperado el 10 de Octubre de 2009, de Tratamiento de aguas residuales: <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm#sistratabio>

Martín@, L. (s.f.). *Las algas: La verdura del mar*. Recuperado el 20 de Marzo de 2010, de En buenas manos: <http://www.enbuenasmanos.com>

MATERIALES Y DISEÑOS@. (2009). *Materiales y diseños*. Recuperado el 9 de Febrero de 2010, de <http://www.maydisa.com/productos/depuracion/presentaciomodel.asp?menu=2&id1=12&id2=62&id3=0&id4=0>

MAVDT@. (2005). *Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Recuperado el 10 de Febrero de 2010, de Decreto 838 de 2005: [http://www.presidencia.gov.co/prensa\\_new/decretoslinea/2005/marzo/23/DEC838230305.pdf](http://www.presidencia.gov.co/prensa_new/decretoslinea/2005/marzo/23/DEC838230305.pdf)

Mejía, C. A. (5 de Febrero de 2010). (J. E. García, & M. Arbeláez, Entrevistadores)

Mercado Martínez, I. D., Reyes Ávila, D., & Agrono Hurtado, V. E. (s.f.). La electrocoagulación, una alternativa. *Residuos* .

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Proyecto de tratamiento de aguas residuales domésticas municipales para ser presentados ante en fondo nacional de regalías*. Colombia.

MONOGRAFÍAS@, A. D. (19 de Agosto de 2000). @Monografías. Recuperado el 9 de Febrero de 2010, de Análisis del agua: <http://www.monografias.com/trabajos10/tratamie/tratamie.shtml#LAGUNAS>

Normas jurídicas de Nicaragua@. (5 de Noviembre de 2002). *NORMA TÉCNICA PARA EL MANEJO Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PELIGROSOS*. Recuperado el 16 de Febrero de 2010, de [http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/%28\\$All%29/F124AB4E19E485950625728A005C2C3F?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/%28$All%29/F124AB4E19E485950625728A005C2C3F?OpenDocument)

Restrepo Mejía, A. P., Arango Ruiz, Á., & Garcés Giraldo, L. F. (2006). La Electrocoagulación: Retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *producción más limpia* , Vol. 1 No. 2.

ROA, H. F. (2006). *Puesta en marcha y evaluación de un reactor anaerobio de*. Bogotá.

SUI@. (2007). *SITUACIÓN DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EN COLOMBIA*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2009, de [http://www.superservicios.gov.co/c/document\\_library/get\\_file?p\\_l\\_id=25030&folderId=25192&name=DLFE-8354.pdf](http://www.superservicios.gov.co/c/document_library/get_file?p_l_id=25030&folderId=25192&name=DLFE-8354.pdf)



TECNOCENCIA@. (Diciembre de 2001). *Tecnociencia*. Recuperado el 22 de Febrero de 2010, de [http://www.tecnociencia.es/especiales/intercambio\\_ionico/introduccion.htm](http://www.tecnociencia.es/especiales/intercambio_ionico/introduccion.htm)

TECNOLOGÍA S.A. DE C.V@. (2001). *Membranas para tratamiento de agua*. Recuperado el 22 de Febrero de 2010, de <http://www.acsmedioambiente.com/LoNuevo/membranas.htm>

Wellos@. (2010). *Bolas de lavado Wellos*. Recuperado el 11 de Abril de 2010, de Wellos: [http://www.bolaswellos.com/?gclid=CL3Cn8\\_EhqECFcNX2godbSB1\\_Q](http://www.bolaswellos.com/?gclid=CL3Cn8_EhqECFcNX2godbSB1_Q)

WIKI LIBROS@. (15 de Octubre de 2008). *WIKI LIBROS*. Recuperado el 15 de Febrero de 2010, de Ingeniería de aguas residuales. Diseño de procesos en digestión anaerobia: [http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa\\_de\\_aguas\\_residuales/Dise%C3%B1o\\_de\\_procesos\\_en\\_digesti%C3%B3n\\_anaerobia](http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Dise%C3%B1o_de_procesos_en_digesti%C3%B3n_anaerobia)

Wikipedia@. (s.f.). *Industria alimentaria*. Recuperado el 10 de Abril de 2010, de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Industria\\_alimentaria](http://es.wikipedia.org/wiki/Industria_alimentaria)

Wikipedia@. (s.f.). *Industrias Químicas*. Recuperado el 10 de Abril de 2010, de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Industria\\_qu%C3%ADmica](http://es.wikipedia.org/wiki/Industria_qu%C3%ADmica)